

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



**DESARROLLO DE UNA SUSPENSIÓN
ACTIVA EN UN VEHÍCULO FERROVIARIO
UTILIZANDO LÓGICA BORROSA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Autor: D. Jorge Rodríguez María

Tutores: Dra. Dña. María Jesús López Boada

D. Rubén Oliva Domínguez

Leganés, Marzo 2015

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quería dedicarles este trabajo a mis padres, por darme todos los medios y la motivación necesarios para llegar hasta aquí.

También a mi hermano, que es un fenómeno y que estoy seguro que llegará muy lejos, por transmitirme su ambición y sus ganas, y por estar siempre ahí.

A Yolanda, por haberme sufrido en época de exámenes y por haberme dado todo el apoyo que he necesitado.

A mis compañeros de material rodante de INECO, que con sus conocimientos y su experiencia me han ayudado mucho para desarrollar este proyecto.

Por último, a mis tutores María Jesús López Boada y Rubén Oliva Domínguez por la ayuda prestada para la realización del proyecto.

ÍNDICE

1.	Introducción	1
1.1	Introducción	2
1.2	Objetivos	2
1.3	Estructura del trabajo.....	3
2.	Suspensión en vehículos ferroviarios	4
2.1	Elementos elásticos.....	5
▪	Resortes de ballesta	5
▪	Resortes helicoidales.....	6
▪	Resortes elastoméricos	8
▪	Suspensión neumática	8
▪	Barra de torsión.....	9
2.2	Elementos amortiguadores.....	10
▪	Amortiguadores de fricción.....	10
▪	Amortiguadores hidráulicos	11
2.3	Tipos de suspensiones.....	13
▪	Según posición.....	13
▪	Según configuración.....	15
2.4	Situación actual de las suspensiones semi-activas y activas en el sector ferroviario.....	20
▪	TREN PENDULAR X2000	20
▪	FIAT PENDOLINO	21
▪	SHINKANSEN SERIES 300-500-700	22
▪	SHINKANSEN Series-E.....	23
▪	CAF: Tecnología SIBI	23
3.	Control.....	24
3.1	Control.....	25
▪	Modelo matemático.....	25
▪	Factores que influyen en el diseño del controlador.....	26
▪	Diseño del controlador.....	27
▪	Análisis y evaluación.....	27
3.2	Estrategias de control.....	28

▪	Metodologías de control convencional.....	28
▪	Medotologías de control inteligente.....	30
4.	Control borroso	31
4.1.	Introducción	32
4.2.	Lógica borrosa	32
▪	Esquema de funcionamiento	32
▪	Entradas y salidas	33
▪	Base de reglas.....	34
▪	Funciones de pertenencia: Cuantificación del conocimiento	35
▪	Fusificación	36
▪	Proceso de inferencia.....	36
▪	Defusificación	37
▪	Ejemplo.....	37
▪	Áreas de aplicación.....	41
5.	Software utilizado	42
5.1.	SIMPACK	43
▪	Preprocesador	43
▪	Ejecución de la simulación	45
▪	Post-procesador	45
6.	Modelo de vehículo ferroviario.....	47
6.1.	Modelo del tren.....	48
▪	Conjunto rueda-eje	48
▪	Bogie.....	49
▪	Suspensión activa	50
▪	Modelo principal. Caja	50
6.2.	Condiciones iniciales e irregularidad de la vía	51
6.3.	Modelo en Simulink del controlador borroso	53
7.	Proceso de cálculo y análisis	54
7.1.	Toma de medidas	55
7.2.	Evaluación de los controladores. Método	55
▪	Norma UNE-EN 12299	56
7.3.	Proceso de cálculo. Resumen.....	59
8.	Simulaciones.....	61
8.1.	Resultados de las simulaciones	62

▪ Parámetros de simulación	62
▪ Suspensión pasiva	62
▪ Suspensión activa 1	67
▪ Suspensión activa 2	73
▪ Suspensión activa 3	76
▪ Suspensión activa 4	79
▪ Suspensión activa 5	84
▪ Suspensión activa 6	87
▪ Suspensión activa 7	91
▪ Suspensión activa 8	98
9. Conclusiones y futuros desarrollos	102
9.1. Conclusiones.....	103
9.2. Futuros desarrollos.....	105
Anexos	106
Bibliografía.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Partes de un resorte de ballesta	5
Figura 2.2 - Resorte de ballesta.....	6
Figura 2.3 - Resortes helicoidales.....	7
Figura 2.4 - Resorte helicoidal y amortiguador concéntricos.....	7
Figura 2.5 - Resortes helicoidales de fleje	7
Figura 2.6 - Resortes elastoméricos	8
Figura 2.7 - Balona neumática.....	8
Figura 2.8 - Balona neumática en tren de cercanías de la serie 447.....	9
Figura 2.9 - Barra de torsión [3]	10
Figura 2.10 - Amortiguador de fricción concéntrico con un resorte helicoidal [3]	11
Figura 2.11 - Amortiguador hidráulico bitubo no presurizado.....	12
Figura 2.12 - Amortiguador hidráulico bitubo presurizado.....	12
Figura 2.13 - Amortiguador hidráulico monotubo presurizado	13
Figura 2.14 - Esquema suspensión de un vehículo ferroviario.....	14
Figura 2.15 - Bogie compartido en tren CIVIA de Renfe.....	14
Figura 2.16 - Suspensión de un tren de la serie 447 de cercanías de Renfe	15
Figura 2.17 - Curva de actuación de un amortiguador.....	15
Figura 2.18 - Región actuación de amortiguador semi-activo	16
Figura 2.19 - Esquema suspensión semi-activa [3]	17
Figura 2.20 - Esquema suspensión activa [3]	18
Figura 2.21 - Región actuación actuador activo	19
Figura 2.22 - Esquema de un actuador electromecánico [4]	19
Figura 2.23 - Esquema de un actuador hidráulico [4]	20
Figura 2.24 - Configuración del tren pendular X2000 [6].....	21
Figura 2.25 - Convoy X 2000	21
Figura 2.26 - Configuración suspensión Fiat Pendolino [9].....	21
Figura 2.27 - Convoy del Fiat Pendolino.....	22
Figura 2.28 - Configuración suspensión Shinkansen series 500 [10]	22
Figura 2.29 - Convoy Shinkansen series 500	22
Figura 2.30 - Convoy de la serie E6 de Shinkansen	23
Figura 2.31 - Convoy de la serie 598 de Renfe	23
Figura 3.1 - Diagrama de bloques del control en lazo cerrado de un proceso	25
Figura 3.2 - Diagrama de bloques de controlador PID	28
Figura 3.3 - Esquema suspensión pasiva vs amortiguador sky-hook	29
Figura 3.4 - Ejemplo de control en lazo cerrado	30
Figura 4.1 - Diagrama de bloques de un controlador borroso	32
Figura 4.2 - Ventana Simulink. Controlador borroso.....	33
Figura 4.3 - Representación gráfica de las funciones de pertenencia.....	35
Figura 4.4 - Tipos de funciones de pertenencia	35
Figura 4.5 - Tipos de funciones de pertenencia	36
Figura 4.6 – Fusificación. Representación gráfica	36
Figura 4.7 - Defusificación. Representación gráfica	37
Figura 4.8 - Conjuntos borrosos para la variable “Error”	38

Figura 4.9 - Conjuntos borrosos para la variable "Variación del Error"	38
Figura 4.10 - Conjuntos borrosos para la variable "Ángulo de salida"	38
Figura 4.11 - Proceso de fusificación. Representación gráfica.....	39
Figura 4.12 - Proceso de defusificación. Representación gráfica.....	39
Figura 4.13 - Grado de pertenencia al conjunto borroso Z para la variable “Ángulo de la válvula” (regla i).....	40
Figura 4.14 - Grado de pertenencia al conjunto borroso NP para la variable “Ángulo de la válvula” (regla ii)	40
Figura 4.15 - Obtención gráfica del valor para la variable de salida. Método CDG.	40
Figura 5.1 - Ventana de preprocesador de SIMPACK	43
Figura 5.2 - Ventana “Jobs” de SIMPACK	45
Figura 5.3 - Ventana de post-procesador de SIMPACK	46
Figura 6.1 - Modelo completo tren en SIMPACK.....	48
Figura 6.2 - Conjunto ruedas-eje.....	49
Figura 6.3 - Bogie completo.....	49
Figura 6.4 - Suspensión primaria	50
Figura 6.5 - Suspensión secundaria	50
Figura 6.6 - Modelo del vehículo ferroviario	51
Figura 6.7 - Irregularidad perfil izquierdo	52
Figura 6.8 - Irregularidad perfil derecho	52
Figura 6.9 - Diagrama de bloques en Simulink de un controlador borroso	53
Figura 7.1 - Puntos de medida.....	55
Figura 7.2 - Situación puntos de medida según UNE-EN 12299.....	56
Figura 7.3 - Situación acelerómetros.....	57
Figura 7.4 - Cálculo NMV desglosado en SIMPACK-Post	58
Figura 7.5 - Esquema conexión SIMPACK-Simulink I	60
Figura 7.6 - Esquema conexión SIMPACK-Simulink II	60
Figura 8.1 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Pasiva	63
Figura 8.2 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Pasiva.....	63
Figura 8.3 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Pasiva	64
Figura 8.4 - Fuerza en amortiguadores. Susp. Pasiva	64
Figura 8.5 - Posición, Velocidad y Aceleración en Punto de medida 1	65
Figura 8.6 - Posición, Velocidad y Aceleración en Punto de medida 2	65
Figura 8.7 - Posición, Velocidad y Aceleración en Punto de medida 3	66
Figura 8.8 - Posición, Velocidad y Aceleración en Punto de medida 4	66
Figura 8.9 - Controlador borroso del vehículo en Simulink.....	67
Figura 8.10 - Controlador para la suspensión activa 1	67
Figura 8.11 - Conjuntos borrosos para la variable "Posición"	68
Figura 8.12 - Conjuntos borrosos para la variable “Velocidad”	69
Figura 8.13 - Conjuntos borrosos para la variable “Fuerza”	69
Figura 8.14 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 1.....	71
Figura 8.15 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 1.....	71
Figura 8.16 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 1	72
Figura 8.17 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 1.....	72
Figura 8.18 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 1.....	73

Figura 8.19 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 2.....	74
Figura 8.20 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 2.....	74
Figura 8.21 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 2	75
Figura 8.22 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 2.....	75
Figura 8.23 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 2.....	76
Figura 8.24 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 3.....	77
Figura 8.25 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 3.....	77
Figura 8.26 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 3	78
Figura 8.27 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 3.....	78
Figura 8.28 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 3.....	79
Figura 8.29 - Controlador borroso en Susp.Activa 4.....	80
Figura 8.30 - Conjuntos borrosos para la variable aceleración	80
Figura 8.31 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 4.....	81
Figura 8.32 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 4.....	82
Figura 8.33 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 4	83
Figura 8.34 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 4.....	83
Figura 8.35 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 4.....	84
Figura 8.36 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 5.....	85
Figura 8.37 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 5.....	85
Figura 8.38 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 5	86
Figura 8.39 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 5.....	86
Figura 8.40 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 5.....	87
Figura 8.41 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 6.....	89
Figura 8.42 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 6.....	89
Figura 8.43 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 6	90
Figura 8.44 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 6.....	90
Figura 8.45 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 6.....	91
Figura 8.46 - Controlador borroso en Susp.Activa 7	95
Figura 8.47 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 7.....	96
Figura 8.48 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 7.....	96
Figura 8.49 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 7	97
Figura 8.50 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 7.....	97
Figura 8.51 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 7.....	98
Figura 8.52 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 8.....	99
Figura 8.53 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 8.....	99
Figura 8.54 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 8	100
Figura 8.55 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 8.....	100
Figura 8.56 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 8.....	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1 - Valores medio a pico de defectos aislados AL & IL [20]	52
Tabla 6.2 - Amplitud y longitud de onda para las irregularidades	52
Tabla 7.1 – Índices de comodidad para el Viajero [22]	59
Tabla 8.1 - Resultados NMV suspensión pasiva	62
Tabla 8.2 - Conjuntos borrosos definidos.....	70
Tabla 8.3 - Conjunto de reglas Susp.Activa 1	70
Tabla 8.4 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 1 vs Susp.Pasiva	73
Tabla 8.5 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 2 vs Susp.Pasiva	76
Tabla 8.6 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 3 vs Susp.Pasiva	79
Tabla 8.7 - Conjunto de reglas Susp.Activa 4	80
Tabla 8.8 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 4 vs Susp.Pasiva	84
Tabla 8.9 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 5 vs Susp.Pasiva	87
Tabla 8.10 - Conjunto reglas Susp.Activa 6	88
Tabla 8.11 - Conjunto de reglas Susp.Activa 7	92
Tabla 8.12 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 7 vs Susp.Pasiva	98
Tabla 8.13 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 8 vs Susp.Pasiva	101
Tabla 9.1 - Resultados de las simulaciones	103

1. Introducción

1.1 Introducción

En la actualidad, el tren es un medio de transporte muy utilizado por su rentabilidad debida a su bajo coeficiente de resistencia a la rodadura. Por ello, existen extensas redes ferroviarias en el mundo que sirven tanto para transportar viajeros como mercancías.

En el sector del transporte existen varios factores a tener en cuenta a la hora de diseñar y desarrollar un determinado sistema. Uno de los más importantes es el tiempo que dura el trayecto. Para un viajero será un factor competitivo en el momento de elegir un medio de transporte u otro. Otro de los factores importantes es el precio del billete para el viajero. Por tanto, desde el punto de vista del ingeniero, se tendrá que desarrollar un sistema que permita reducir el tiempo del viaje y mantener un coste moderado.

Para poder reducir ese tiempo se requiere aumentar la velocidad del vehículo, pero siempre manteniendo el mismo nivel de confort. Sin embargo, debido al trazado y a las condiciones de la vía principalmente, aumentar la velocidad implica reducir severamente el confort o incluso comprometer la seguridad pudiéndose alcanzar la condición de descarrilamiento. Por tanto, el siguiente paso es conseguir una tecnología que permita adaptar el vehículo a las distintas condiciones a las que se enfrente a lo largo de su recorrido.

Con un sistema de suspensión pasiva no parece sencillo resolver este problema, pues el comportamiento del vehículo será tan variable como lo sean las condiciones del trazado. En este punto entran en juego las suspensiones activas y semi-activas, pues permiten adaptar el vehículo a las condiciones del trazado y de la vía, consiguiendo de esta manera poder incrementar la velocidad del mismo manteniendo el nivel de confort en marcha.

De manera simultánea al desarrollo de una suspensión semi-activa o activa se requiere el diseño de la unidad de control que gobierne el comportamiento de la misma. El modo de controlar la actuación de la suspensión se puede llevar a cabo de diferentes maneras y una de ellas, y que supone el centro del presente proyecto, es el control borroso o control *fuzzy*.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es obtener conclusiones acerca del uso de la lógica borrosa en el control de la suspensión secundaria vertical en un vehículo ferroviario. Concretamente, conclusiones relacionadas con la influencia de las distintas variables de entrada o salida para el controlador.

Otro objetivo es estudiar la influencia de un sistema de suspensión de este tipo sobre el confort del viajero mediante la normativa pertinente.

Este estudio se realiza utilizando dos programas. Por un lado, SIMPACK, utilizado para el comportamiento dinámico del vehículo ferroviario, y por otro lado, Simulink, que permite simular el algoritmo de control. Por ello, también se persigue estudiar, desarrollar y obtener resultados sobre el uso combinado de ambos programas, en el caso particular de la suspensión secundaria vertical de un vehículo ferroviario.

1.3 Estructura del trabajo

El presente Proyecto Fin de Carrera está dividido en 11 capítulos. A parte del primero de estos, la Introducción, cada capítulo trata los temas que siguen a continuación:

- En el Capítulo 2 se desarrollan y explican los conceptos básicos referentes a los elementos que constituyen la suspensión de un tren, los tipos de suspensiones que existen y por último, se establecen los precedentes que existen en este campo de estudio y su aplicación en el mercado actual.
- En el Capítulo 3 se describe el concepto de “Control” y los factores a tener en cuenta a la hora de desarrollar un controlador, así como se presenta una pequeña descripción de los algunos de los métodos de control.
- En el Capítulo 4 se explica en detalle en qué consiste la lógica borrosa y las partes de las que ésta se compone. También se presenta un ejemplo explicativo del funcionamiento de la misma.
- En el Capítulo 5 se introduce el programa utilizado para simular el comportamiento dinámico del vehículo ferroviario, SIMPACK, presentando las partes de las que se constituye y el alcance del mismo.
- En el Capítulo 6 se presenta el modelo elegido para las simulaciones. Se describen las partes que componen el modelo en SIMPACK, las condiciones de simulación y el modelo del controlador en Simulink.
- En el Capítulo 7 se detalla el proceso llevado a cabo para para la toma de medidas, para la evaluación de los resultados, y por último para la realización de las simulaciones.
- En el Capítulo 8 se presentan las simulaciones realizadas mediante las gráficas y tablas correspondientes a los resultados obtenidos para cada controlador planteado.
- En el Capítulo 9 se analizan los resultados obtenidos en el capítulo 6 y se exponen las posibles vías para continuar la línea de estudio de este proyecto.

2. Suspensión en vehículos ferroviarios

La suspensión en un vehículo la constituyen aquellos elementos elásticos, amortiguadores y otros componentes cuya finalidad es proporcionar la protección de los órganos del vehículo, independientemente del estado de la vía y las condiciones de utilización; la estabilidad del vehículo; y la comodidad de los pasajeros o la protección de las mercancías transportadas mediante la reducción de los movimientos verticales, longitudinales, transversales y angulares de la masa suspendida. Estos elementos conectan las ruedas con el bogie, y el bogie con la caja, constituyendo así la suspensión primaria y secundaria respectivamente [1].

Los dispositivos que componen la suspensión de un vehículo ferroviario son de dos tipos: elementos elásticos y elementos amortiguadores. Los elementos elásticos son aquellos que soportan el peso que tienen sobre ellos. La deformación elástica que sufren permite minimizar el efecto de los movimientos que se producen en el vehículo. La energía que almacenan durante su deformación elástica sirve para devolver a su posición original a los elementos desplazados. Sin embargo, ante una excitación, los elementos elásticos generan movimientos oscilatorios hasta que vuelven a la posición de equilibrio. Los elementos amortiguadores son los encargados de neutralizar estos movimientos oscilatorios mediante la disipación de energía.

2.1 Elementos elásticos

Los elementos elásticos cumplen las siguientes funciones:

- Equilibrar las cargas verticales entre las ruedas, pues una rueda sin la carga suficiente no asegura el contacto y pone en peligro la circulación del vehículo.
- Estabilizar la marcha del vehículo por la vía.
- Reducir los efectos de las irregularidades del trazado y de la vía

Existen diversos tipos de elementos elásticos. A continuación se describen algunos de ellos.

- **Resortes de ballesta**

Formados por láminas de acero resistente y elástico. Tienen sección tanto variable como constante y su perfil puede ser rectangular, parabólico o trapezoidal. Su configuración es como muestra la figura 2.1.

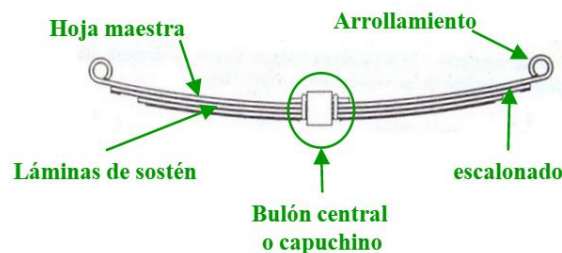


Figura 2.1 - Partes de un resorte de ballesta



Figura 2.2 - Resorte de ballesta

Atendiendo a las figuras 2.1 y 2.2, existe una hoja maestra que es la primera y la de mayor longitud, que presenta unos arrollamientos en sus extremos para poder fijar el resorte. Mediante el bulón central o capuchino se ensamblan las láminas. Estas láminas superpuestas van reduciendo de tamaño y aumentando su curvatura, formando un escalonado. Las láminas trabajan de forma conjunta y dependiendo de la configuración, la rigidez del resorte cambia.

Son uno de los elementos de suspensión más antiguos y aún se utilizan por varias razones. Son elementos atractivos desde el punto de vista económico. El movimiento de flexión hace que las láminas contacten unas con otras produciendo fricción entre ellas. Esta fricción disipa energía y permite un cierto grado de amortiguamiento. Por otro lado, dicha fricción puede conducir al desgaste y oxidación de las láminas que va provocando cada vez más fricción y más amortiguamiento, por lo que éste no sería constante a lo largo del tiempo. Para evitar estos efectos negativos se recurre al engrase, aunque esta solución disminuye el amortiguamiento. Por tanto, la mejor forma de resolver estos problemas es recurrir a un amortiguador que trabaje junto con el resorte de ballesta. Además, dada su configuración, ayudan al guiado lateral y longitudinal.

Por otro lado, presentan la desventaja del gran espacio requerido para su implantación. Con la utilización de materiales compuestos se ha reducido el número de láminas y su curvatura, llegando a necesitarse solamente una, ya que se reduce el problema del peso y de la fricción entre las láminas. Sin embargo, este tipo de ballestas presentan problemas constructivos y tensionales, así como un alto coste.

En cuanto a su aplicación en el sector del ferrocarril, este tipo de resortes se utilizan en trenes de mercancías por su alta capacidad de carga.

- **Resortes helicoidales**

Este tipo de resortes está constituido por un alambre de acero de alta resistencia enrollado en espiral. La sección del alambre generalmente es circular aunque también existen de sección elíptica o rectangular, así como de sección constante o variable.

Estos resortes se comprimen en el sentido de su eje longitudinal quedando sometidos a flexión.



Figura 2.3 - Resortes helicoidales

Son los elementos elásticos más económicos y robustos. Además son de fácil fabricación y mantenimiento, presentan un bajo peso, reducidas dimensiones y su regulación es más precisa. En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de este tipo de resorte.

Una de las configuraciones más utilizadas es la de colocar dos resortes de este tipo concéntricos uno dentro del otro, lo que equivale a dos resortes trabajando en paralelo. En otros casos, se colocan dos resortes del mismo modo pero de distintas longitudes, de manera que hasta que no se alcanza una determinada fuerza de compresión no comienzan a actuar los dos conjuntamente. Otra configuración muy utilizada es la de disponerlos de manera concéntrica a un amortiguador colocado en su interior. De esta manera se ahorra espacio y se consigue un sistema de suspensión con buenas prestaciones. Un ejemplo de esta configuración se muestra en la figura 2.4.



Figura 2.4 - Resorte helicoidal y amortiguador concéntricos

Un caso particular de los resortes helicoidales, que se muestra en la figura 2.5, son los resortes de fleje. Se caracterizan por tener un comportamiento no lineal y su uso es extendido en trenes de viajeros.

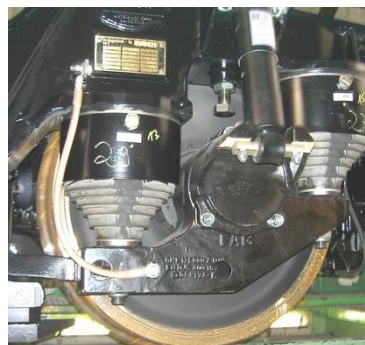


Figura 2.5 - Resortes helicoidales de fleje

▪ Resortes elastoméricos

Son elementos de caucho utilizados como complemento de otro tipo de elementos elásticos. No presentan unas propiedades adecuadas para constituir toda la suspensión de un vehículo, sin embargo se utilizan en combinación con otros elementos de la suspensión por diversos motivos. Se encargan de eliminar las vibraciones de alta frecuencia, debido a la histéresis natural del material, y se disponen de manera que controlen la suspensión de un elemento en concreto. El inconveniente que presentan es el material del que están hechos, el caucho, que se degrada antes que los elementos metálicos y por tanto el mantenimiento y la posterior sustitución deben ser más frecuentes.

Entre sus ventajas destacan la eliminación del desgaste entre superficies con deslizamiento y la reducción de ruidos de alta frecuencia.

Por estar fabricados de caucho presentan varias desventajas adicionales. Una de ellas es la tendencia natural que tienen a fluir o a la inestabilidad. También presentan una memoria de carga, es decir, sufren cambios permanentes en sus propiedades debido a las cargas que soportan. La temperatura es otro de los factores que juega en contra de este tipo de resortes, pues variaciones grandes pueden deformarlos permanentemente. Para corregir estos defectos, se suelen construir con placas de acero intercaladas entre las partes de caucho.

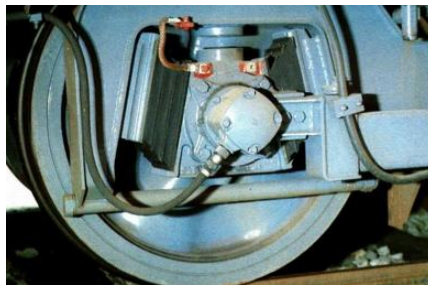


Figura 2.6 - Resortes elastoméricos

En la figura 2.6 se observan dos resortes elastoméricos en los laterales de la caja de grasa.

▪ Suspensión neumática

Se utiliza principalmente en la suspensión secundaria de un vehículo ferroviario. Consiste en una estructura de goma sintética con un refuerzo de fibra de nylon, con forma de balón o cojín. Este balón, balona o fuelle neumático se puede ver en la figura 2.7.



Figura 2.7 - Balona neumática

En el interior del mismo, se encuentra un émbolo que permite el movimiento vertical y su funcionamiento se debe a la presión del aire que contiene el balón en su interior. Ante un desplazamiento vertical, se produce una variación de la presión del aire. El aumento de presión obliga al resorte a volver a su posición inicial y mediante el émbolo se produce el movimiento vertical relativo entre bogie y caja. Este sistema de suspensión es particularmente interesante en vehículos que dispongan de un circuito neumático ya instalado, como puede ser el caso de un sistema de frenos neumático, ya que se aprovecha el mismo circuito para dos sistemas distintos.

Por su construcción, el balón neumático es capaz de atenuar vibraciones e impactos de manera multidireccional. Además, reduce ruidos, es de peso reducido y su comportamiento se puede variar modificando la presión interior. Con estas propiedades, este sistema es capaz de mantener una altura constante de la caja, pues se inyecta o fuga aire según se requiera, e incluso es capaz de funcionar sin necesidad de ningún otro elemento amortiguador. Otra de las ventajas, al contrario que los resortes helicoidales, es que poseen una gran capacidad de filtrado de las frecuencias altas.

Por otro lado, requiere un circuito neumático, con el consecuente mantenimiento. Su instalación es costosa y obliga a disponer elementos adicionales de empuje y reacción que solucionen los problemas de estabilidad longitudinal y transversal que esta suspensión presenta, con el consecuente aumento de peso global. Esto se compensa al existir la posibilidad de aprovechar los circuitos neumáticos del tren ya implantados, como el correspondiente al sistema de frenos.

Este sistema es muy utilizado como suspensión secundaria por las prestaciones que proporciona y está presente en numerosos diseños. Una configuración en la que está presente este resorte neumático se muestra en la figura 2.8, en la que además se ha montado junto con un amortiguador vertical, constituyendo así una parte de la suspensión secundaria del vehículo.



Figura 2.8 - Balón neumático en tren de cercanías de la serie 447

- **Barra de torsión**

Las barras de torsión consisten en un tipo de resorte formado por una barra unida a una palanca, como se observa en la figura 2.9. Su disposición es tal, que un desplazamiento vertical en la palanca provoca un momento torsor en la barra.

Este sistema sólo sirve para vibraciones e impactos en una única dirección. Sin embargo puede hacer frente a grandes deformaciones, tiene un peso reducido y requiere poco espacio.

Las desventajas principales de este tipo de resorte son su compleja producción y el desplazamiento longitudinal que se provoca ante un desplazamiento vertical debido al giro de la palanca [1] y [2].



Figura 2.9 - Barra de torsión [3]

2.2 Elementos amortiguadores

Como se ha comentado al inicio de este capítulo, la amortiguación consiste en neutralizar los movimientos oscilatorios provocados en los elementos elásticos, como consecuencia de las condiciones del trazado o de la vía, mediante la disipación de energía. Existen dos tipos principales, los amortiguadores de fricción y los hidráulicos. A continuación se describen brevemente.

- **Amortiguadores de fricción**

Este tipo de amortiguadores basan su funcionamiento en la fricción de dos superficies. Su construcción es similar a la de cilindro-pistón en un motor. La superficie exterior del émbolo y la interior del cilindro están en contacto. Cuando existe movimiento relativo entre émbolo (2 en la figura 2.10) y cilindro (1 en la figura 2.10) se produce la fricción de los mismos, disipando así energía en forma de calor.

Existen distintas construcciones dependiendo de si actúan en una sola dirección, en el plano o en el espacio; o de si la fuerza de fricción es constante o variable a lo largo de la carrera del amortiguador. Los más utilizados son los amortiguadores telescópicos.

Además, por razones de espacio, es muy común encontrar este tipo de amortiguadores situados concéntricamente en el interior de resortes helicoidales, como se ha comentado en el apartado 2.1. En la figura 2.10 se observa un corte transversal de este tipo de configuración.

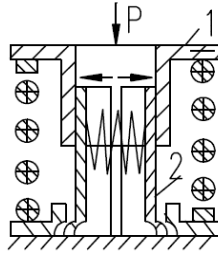


Figura 2.10 - Amortiguador de fricción concéntrico con un resorte helicoidal [3]

Una de las desventajas de este tipo de amortiguadores es el desgaste que se origina en las caras friccionadas, variando su comportamiento, lo que implica un cambio periódico de piezas. Por otro lado, hasta que no se supera la fuerza de rozamiento, la suspensión permanece bloqueada. Además, una vez superada ese umbral, la fuerza amortiguadora disminuye y no aumenta como se desearía.

Debido a su simplicidad, bajo coste y fácil mantenimiento, los amortiguadores de fricción se utilizan sobre todo en trenes de mercancías [3].

▪ Amortiguadores hidráulicos

Los amortiguadores hidráulicos tienen el mismo funcionamiento que los anteriores, con la diferencia que la fricción no se produce entre las caras del cilindro y del émbolo directamente, si no que existe un fluido viscoso entre las mismas. Dado que el fluido hidráulico es prácticamente incompresible se disponen unas válvulas que permiten el paso de éste entre las distintas cámaras del cilindro. El paso del fluido hidráulico de una cámara a otra disipa energía en forma de calor. Es de destacar que conforme aumenta la velocidad, la fuerza amortiguadora crece también y es la configuración de las válvulas determina el comportamiento del amortiguador. A continuación se describen 3 tipos de amortiguadores hidráulicos.

Bitubo no presurizados

Dispone de dos tubos concéntricos como muestra la figura 2.11. Cuando el pistón baja, desplaza al fluido y lo dirige hacia el otro tubo por medio de unas válvulas. Estos amortiguadores presentan una serie de desventajas. Cuando el amortiguador lleva un tiempo sin entrar en servicio, el aceite de la cámara principal cae por gravedad. Además, se forma espuma durante el movimiento del pistón, como consecuencia de la mezcla de aire y aceite. Sin embargo este tipo de amortiguadores hidráulicos son los más económicos.

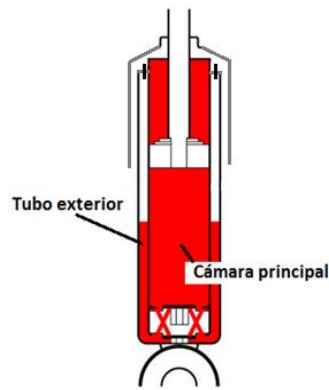


Figura 2.11 - Amortiguador hidráulico bitubo no presurizado

Bitubo presurizados

A diferencia del anterior, este tipo de amortiguadores presentan una cámara de gas que evita la formación de espuma, como muestra la figura 2.12. El gas es nitrógeno y se encuentra a una presión de 4 bares, y se encarga de comprimir las burbujas de aire que se producen durante la bajada y subida del pistón. Presentan varias ventajas frente a los bitubo no presurizados: tienen una respuesta más sensible ante pequeños movimientos, en condiciones extremas funcionan mejor y no generan tanto ruido de origen hidráulico. Además, si pierden el gas siguen funcionando.

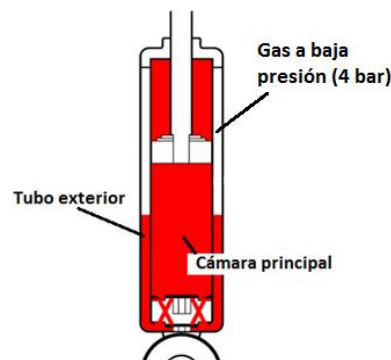


Figura 2.12 - Amortiguador hidráulico bitubo presurizado

Monotubo presurizados

Este tipo de amortiguadores presentan un único tubo, lo que los hace de mayor longitud. También disponen de un mayor área de trabajo, por ser el diámetro del pistón mayor. El pistón es flotante y separa las cámaras de aceite y de gas. Al mismo tiempo, el aceite tiene mejor refrigeración al estar la cámara en contacto directo con el aire exterior. En este caso, el aceite no baja por gravedad y debido a la presurización tampoco forma espuma. Al solo disponer de un tubo, la cámara de gas está a una presión de 25 bares, ya que ha de ser capaz de resistir la máxima carga de trabajo. Esta cámara de gas produce un funcionamiento silencioso y devuelve a su posición original al amortiguador en condiciones de reposo, como si de un resorte elástico se tratara.

Se trata de la solución más costosa por su fabricación y por el problema derivado de la estanqueidad del gas. Además el diseño de la suspensión ha de tener en cuenta la presión de la cámara de gas [1]. Un ejemplo de este tipo de amortiguador se observa en la figura 2.13.

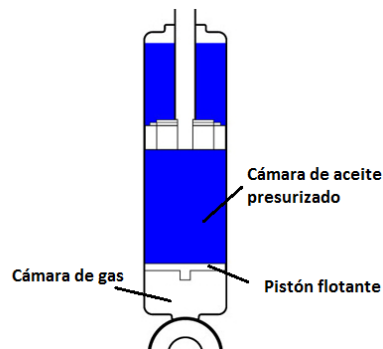


Figura 2.13 - Amortiguador hidráulico monotubo presurizado

2.3 Tipos de suspensiones

Se puede hablar de dos clasificaciones para una suspensión. Por un lado, en vehículos ferroviarios se diferencia entre suspensión primaria y secundaria, cuya posición y características son diferentes. Por otro lado, atendiendo al modo de actuación de la suspensión se diferencia entre 3 tipos principales, las pasivas, las semi-activas y las activas. En los siguientes apartados se detallan cada una de ellas.

- Según posición

Como muestra la figura 2.14 la suspensión de un vehículo ferroviario se compone de la suspensión primaria, que se dispone entre la masa no suspendida y el bogie, y la suspensión secundaria, que va montada entre el bogie y la caja.

Suspensión primaria

La suspensión primaria la constituyen los elementos elásticos y amortiguadores que unen las ruedas con el bogie. Su función es reducir las vibraciones e impactos consecuentes de las irregularidades de la vía y del trazado, que se transmiten al bogie y después a la caja. También es la encargada de asegurar un reparto homogéneo de carga entre las ruedas. Esto es importante, pues un desequilibrio en las cargas podría ocasionar el descarrilamiento. Hay que destacar que la configuración de la suspensión primaria es siempre de mayor rigidez que la secundaria, pues asegurar el contacto rueda-carril es fundamental.

Existen distintas configuraciones según las prestaciones que se busquen y el tipo de vehículo ferroviario.

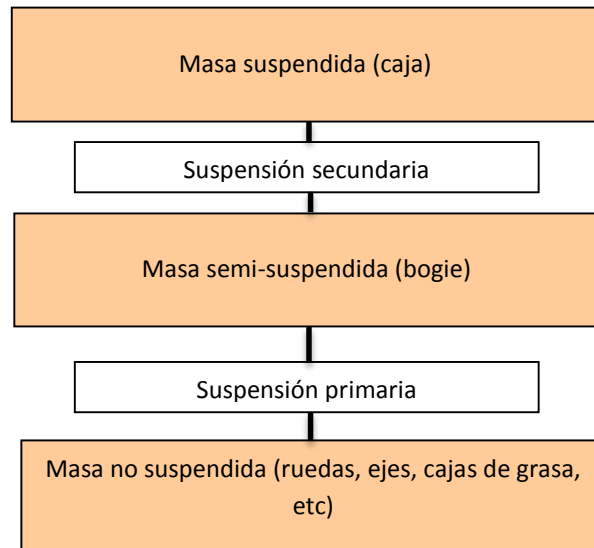


Figura 2.14 - Esquema suspensión de un vehículo ferroviario

Suspensión secundaria

La suspensión secundaria está formada por aquellos elementos elásticos y amortiguadores situados entre el bogie y la caja. El objetivo de la secundaria es filtrar las vibraciones para que éstas no afecten a los pasajeros o a la carga. Con la suspensión secundaria también se reducen vibraciones en dirección lateral, además de en dirección vertical. Análogamente al apartado anterior, hay que destacar que la suspensión secundaria es menos rígida que la primaria. Esto es debido, a que en este caso no se pretende devolver rápidamente la caja a su posición original, si no que el objetivo que se persigue es optimizar el confort de los viajeros y reducir al máximo los efectos de las vibraciones sobre la carga.

Según el tipo de vehículo se encuentran diversas configuraciones de suspensión secundaria.

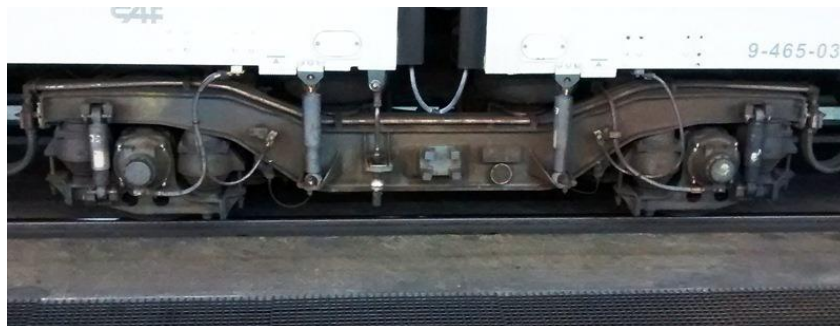


Figura 2.15 - Bogie compartido en tren CIVIA de Renfe

La figura 2.15 muestra la suspensión del tren de cercanías CIVIA. Se aprecia la suspensión primaria formada por dos resortes elastoméricos y un amortiguador por cada rueda. En cuanto a la suspensión secundaria se observan dos balonas neumáticas y dos amortiguadores verticales. En el caso del modelo 446 o 447 de cercanías, la suspensión primaria está constituida por resortes helicoidales y un amortiguador vertical por cada rueda.

La suspensión secundaria está formada por una balona neumática y un amortiguador vertical, como se aprecia en la figura 2.16.



Figura 2.16 - Suspensión de un tren de la serie 447 de cercanías de Renfe

- Según configuración

Suspensión pasiva

La suspensión pasiva es aquella que no se compone de ningún elemento adicional al conjunto resorte-amortiguador, como por ejemplo una unidad de control o un actuador. No es regulable, pues basa su funcionamiento en las constantes de rigidez y de amortiguación, que son fijas. Una suspensión de este tipo almacena energía mediante resortes y la disipa mediante amortiguadores. Resulta el tipo de suspensión más económica, sin embargo, el hecho de no ser controlable la hace vulnerable ante irregularidades en la vía o cambios en los parámetros del vehículo. En la figura 2.17 se puede observar la curva de actuación de un amortiguador pasivo.



Figura 2.17 - Curva de actuación de un amortiguador

Por las limitaciones de una configuración pasiva, se describen a continuación las suspensiones activas y semi-activas. El objetivo de implantar una suspensión de este tipo en un vehículo ferroviario es mejorar la dinámica del mismo. Se puede mejorar el confort del pasajero, circular a mayores velocidades manteniendo esas condiciones de confort, mantener un nivel de confort adecuado a pesar de las condiciones de la vía, mejorar la circulación en

curva o incrementar la estabilidad del vehículo ante mayores velocidades. En los dos siguientes apartados se describen ambas suspensiones en detalle.

Suspensión semi-activa

Este tipo de suspensiones se caracterizan por tener elementos cuyo comportamiento es regulable. Generalmente, una suspensión semi-activa controla las frecuencias bajas con elementos activos y las frecuencias altas con elementos pasivos.

La regulación de la actuación de los elementos se produce a través de sensores que envían información a una unidad de control. Esta unidad de control regula el comportamiento del elemento en cuestión en base a esa información.

Debido a que funcionan igual que una suspensión pasiva, pero con los amortiguadores regulables, las suspensiones semi-activas también trabajan en el 1^{er} y 3^{er} cuadrante del diagrama fuerza-velocidad como muestra la figura 2.18. A diferencia de un amortiguador pasivo, los semi-activos trabajan en un rango de valores, permitiendo así una mejor adaptación a las condiciones del trazado.

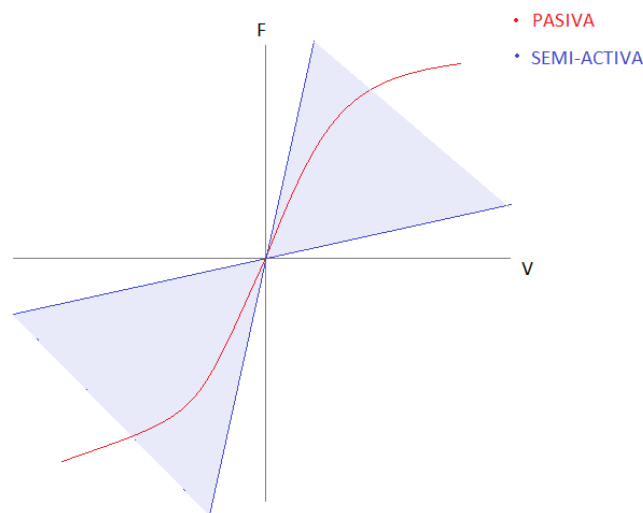


Figura 2.18 - Región actuación de amortiguador semi-activo

A continuación se muestran un esquema de una suspensión semi-activa (Figura 2.19). Como se ha comentado, una suspensión semi-activa difiere de una pasiva en el conjunto de sensores y la unidad de control. Estos elementos adicionales recogen y analizan la información que permiten regular la actuación del elemento determinado de la suspensión. Dado que no aportan energía extra al sistema de suspensión (solamente disipan energía), las suspensiones semi-activas no requieren de una unidad de energía externa para su funcionamiento.

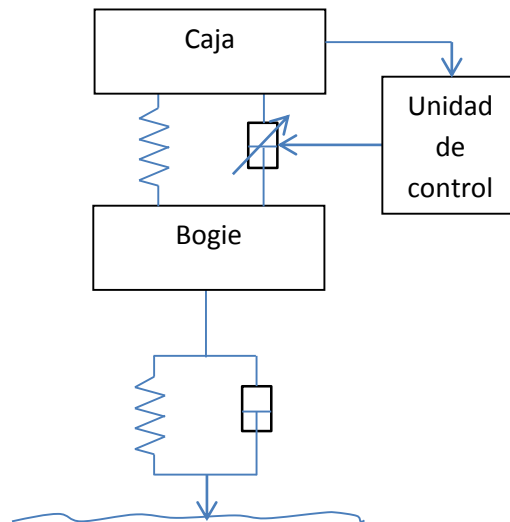


Figura 2.19 - Esquema suspensión semi-activa [3]

Los elementos regulables más desarrollados y representativos de una suspensión semi-activa se describen a continuación.

Elementos neumáticos

Para los elementos neumáticos, la variable que permite regular el comportamiento es la presión del aire. Como ya se ha comentado anteriormente, un sistema neumático presenta la ventaja de que puede servirse del sistema de frenos, también neumático. Otra de las ventajas de trabajar con aire es que éste se recoge del ambiente y no presenta los problemas de un sistema hidráulico en caso de fuga. Por ello, este tipo de actuadores resultan económicos. Por otro lado, el aire presenta una elevada compresibilidad haciendo controlable tan sólo un ancho de banda de 2 a 3 Hz, lo que limita mucho a este tipo de dispositivos. Además, la fuerza que puede proporcionar un amortiguador neumático es bastante menor en relación a un amortiguador hidráulico, por ejemplo.

Amortiguadores basados en electroválvulas

Los amortiguadores basados en electroválvulas varían su comportamiento mediante una unidad de control que abre o cierra una válvula, que permite el paso del fluido hidráulico de una cámara a otra. Este tipo de elementos presentan dos problemas principales: contienen partes móviles y sus tiempos de respuesta son elevados. Como solución a estos problemas se encuentran los elementos magneto-reológicos y electro-reológicos que se describen en el siguiente apartado.

Reológicos

Este tipo de elementos de la suspensión utilizan un tipo especial de fluido que cambia su viscosidad ante la presencia de un campo eléctrico o magnético. Existen por tanto dos tipos, los amortiguadores electro-reológicos y los magneto-reológicos. El cilindro contiene un fluido de baja viscosidad con partículas eléctricas o magnéticas. En función de la intensidad del campo aplicado, la viscosidad del fluido cambia permitiendo así el movimiento de traslación del amortiguador. La viscosidad del fluido aumenta con el campo aplicado, controlando así el

proceso de amortiguación. Este tipo de amortiguadores no son excesivamente costosos y presentan un bajo consumo de energía. Además permiten controlar un amplio ancho de banda, lo que los hace muy competitivos.

Suspensión activa

La suspensión activa consiste en sustituir o añadir un actuador que proporcione la fuerza requerida en cada instante de tiempo. Existen varias configuraciones como por ejemplo situar el actuador en paralelo con la suspensión, en serie o, como en el caso de este proyecto, sustituir directamente el amortiguador por el actuador.

Una suspensión activa se caracteriza por tener la posibilidad de almacenar, disipar y aportar energía. A diferencia de una suspensión semi-activa, las suspensiones activas requieren un aporte de energía externo, como muestra la figura 2.20, dados los elementos de los que se compone. Esto se presenta a priori, como una desventaja, pues incrementa el coste y la complejidad de la suspensión. Por otro lado, una suspensión activa ofrece una mejor respuesta en un amplio ancho de banda de frecuencias y un mayor control de los parámetros de la misma. A diferencia de una suspensión pasiva o semi-activa, una suspensión activa actúa en los 4 cuadrantes del diagrama fuerza-velocidad citado anteriormente, como muestra la figura 2.21.

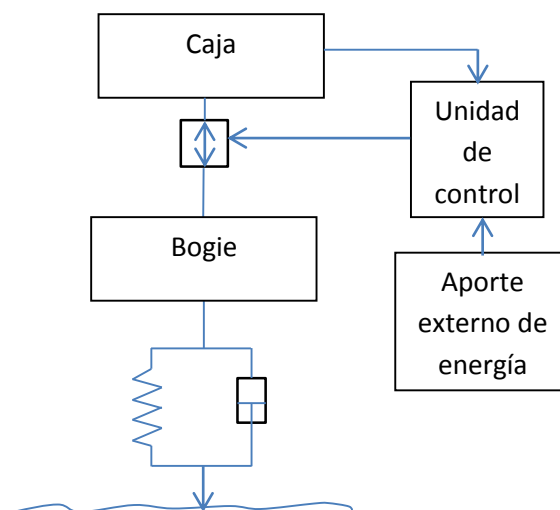


Figura 2.20 - Esquema suspensión activa [3]

Este tipo de suspensiones es de gran aplicación en vehículos automóviles o en aeronaves. En vehículos ferroviarios el uso de suspensiones activas es más reducido. Sin embargo, como se desarrolla en el apartado 2.4, la utilización de suspensiones activas para sistemas de basculación en curva es una práctica extendida.

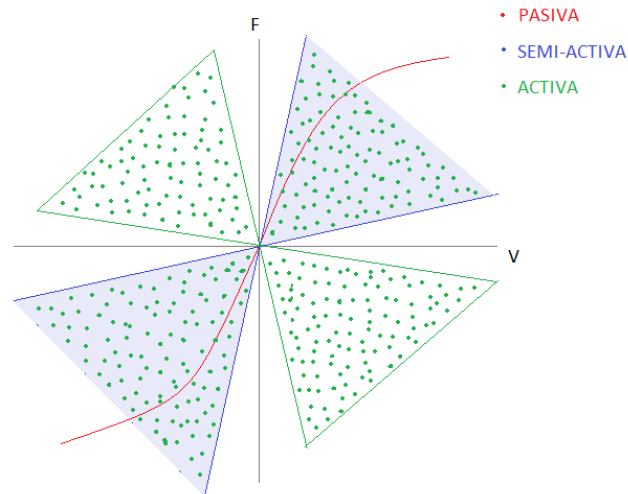


Figura 2.21 - Región actuación actuador activo

En las suspensiones activas se requiere un elemento que ejecute la fuerza deseada. Este elemento se denomina actuador. Existen diferentes tipos de actuadores según su funcionamiento, que son los siguientes:

Electro-mecánico

Un actuador de este tipo está alimentado por un motor eléctrico. Este motor hace girar un eje roscado que permite el movimiento longitudinal del elemento sobre el que se monta el actuador, como puede observarse en la figura 2.22. El control en este caso se establece en función del giro del motor eléctrico. Las desventajas de este tipo de actuadores son que tienden a ser menos compactos y los componentes mecánicos llevan asociado un mantenimiento considerable.

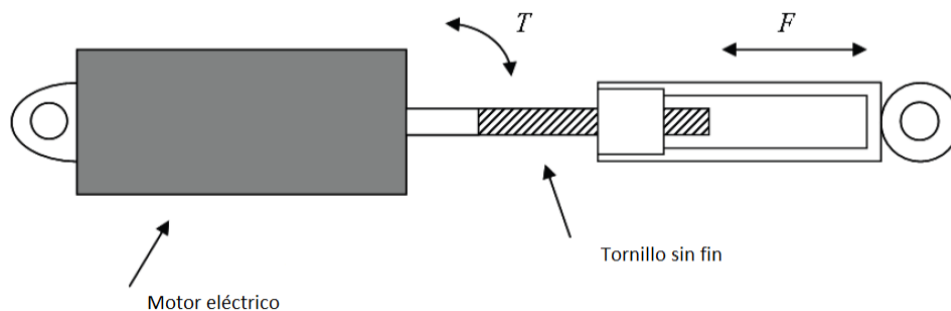


Figura 2.22 - Esquema de un actuador electromecánico [4]

Electro-magnético

Un actuador electro-magnético consiste en un par de electroimanes enfrentados. Cuando circula corriente eléctrica estos imanes se atraen o se repelen. Se generan por tanto, fuerzas de atracción o repulsión que provocan el movimiento del actuador. Dado que no tiene partes móviles, como es el caso del actuador electromecánico, este tipo de actuador resulta muy robusto y fiable. Sin embargo puede presentar problemas por la existencia de aire en la cámara en la que se encuentran los imanes.

Hidráulico

Un actuador hidráulico se basa en el paso de un fluido de una cámara a otra del cilindro del mismo. Como muestra la figura 2.23, un motor controla la bomba que gobierna el paso del fluido en ambos sentidos. El control del paso de fluido permite el movimiento del actuador. Este tipo de actuadores son de menor tamaño y más económicos en comparación con los actuadores electromecánicos o neumáticos. Son fáciles de acoplar, sin embargo cuando se incluye la fuente de energía el sistema resulta de gran tamaño e ineficaz [4].

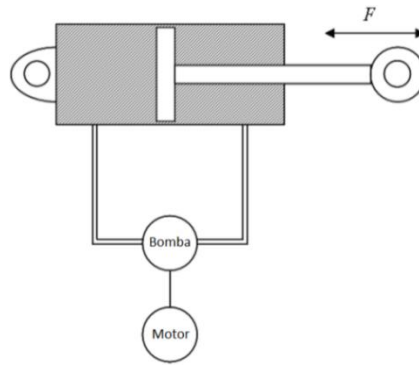


Figura 2.23 - Esquema de un actuador hidráulico [4]

Por último, al igual que para el caso de las suspensiones semi-activas, en las activas también se utilizan actuadores neumáticos. Su funcionamiento es idéntico al de las suspensiones semi-activas ya explicado, con la salvedad de que en este caso el actuador neumático puede aportar energía al sistema, además de disiparla.

2.4 Situación actual de las suspensiones semi-activas y activas en el sector ferroviario.

En la actualidad existen trenes en circulación con suspensiones semi-activas y activas. Sin embargo, debido a su coste y a su actual desarrollo su implantación es limitada en el mundo. La aplicación principal de este tipo de configuraciones es la basculación de la caja en curva, como se desarrolla en los ejemplos siguientes.

▪ TREN PENDULAR X2000

Desarrollado por ADtranz (Hoy Bombardier) y puesto en circulación en 1990, consiste en un tren pendular con suspensión activa que permite incrementar la velocidad en las curvas hasta un 30%. Como muestra la figura 2.24, este tren dispone de una barra pendular accionada mediante cilindros hidráulicos que permite la basculación de la caja en las curvas. El grado de inclinación se ajusta a través de los sensores que detectan el peralte las mismas.

A modo experimental se probó una suspensión semi-activa en combinación con la suspensión activa para la basculación. Sin embargo, tan sólo la suspensión activa para la basculación en curva es la tecnología implantada y operativa en este tren [6] y [7].

En la figura 2.25 se muestra una imagen del tren pendular X2000.

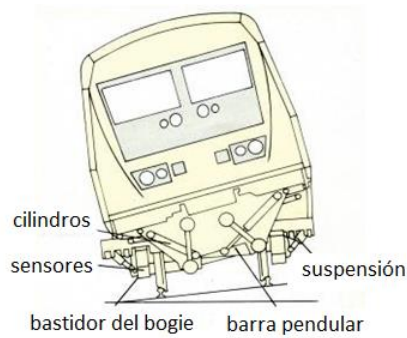


Figura 2.24 - Configuración del tren pendular X2000 [6]



Figura 2.25 - Convoy X 2000

■ FIAT PENDOLINO

El primer tren de esta serie entró en servicio en 1976. Fue desarrollado por Fiat, adquirida por Alstom en el año 2000. Presentaba problemas de confort para los viajeros, pues la idea de compensar totalmente la fuerza centrífuga mareaba a los usuarios. Se desarrollaron diferentes modelos que mejoraron el confort en marcha y resolvieron este problema. La configuración de la suspensión activa de este tren es la que muestra la figura 2.26. Dispone de unos cilindros hidráulicos que inclinan la caja según la información que reciben de los acelerómetros [8] y [9]. En la figura 2.27 se puede observar una imagen del Fiat Pendolino.

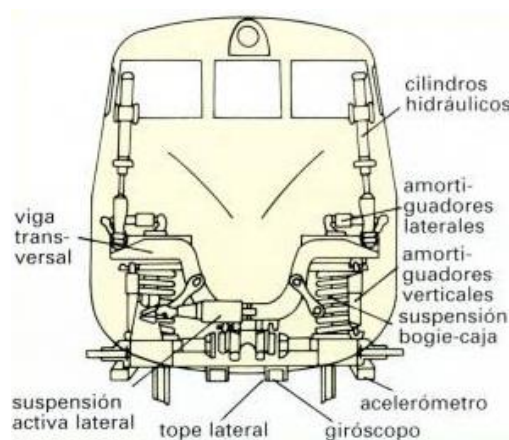


Figura 2.26 - Configuración suspensión Fiat Pendolino [9]



Figura 2.27 - Convoy del Fiat Pendolino

■ SHINKANSEN SERIES 300-500-700

En Japón, la compañía JR-West opera en su red ferroviaria con trenes que llevan incorporados sistemas de suspensión activa y semi-activa. La serie 500 por ejemplo, está en servicio desde 1997 con un sistema de suspensión semi-activa utilizando como método de control el sky-hook. La serie 300 también se utilizó para ensayos de sistemas de suspensión de este tipo. Fruto de estos estudios, el modelo series 700 comenzó a operar en 1999 con un sistema de suspensión semi-activa, precedido por el series 500 en 1996. Este sistema lograba alcanzar el mismo confort a 300 km/h que en el caso de una suspensión pasiva a una velocidad de 270 km/h [10] y [11].

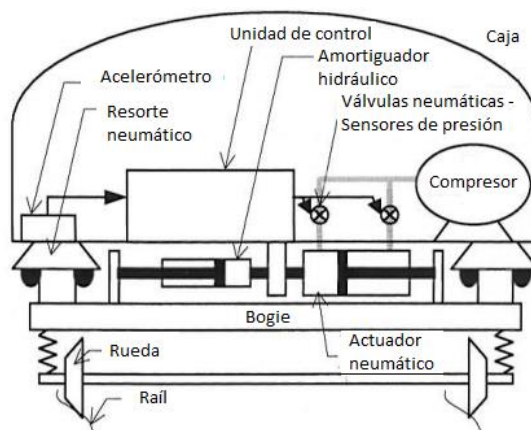


Figura 2.28 - Configuración suspensión Shinkansen series 500 [10]

En la figura 2.29 se puede observar un convoy de la serie 500 de Shinkansen.



Figura 2.29 - Convoy Shinkansen series 500

- SHINKANSEN Series-E

La compañía japonesa ha seguido incorporando diferentes modelos desde el modelo E-1 hasta la última serie puesta en servicio, la E6, que dispone de suspensión activa en combinación con un sistema de basculación que permite operar a 320 km/h desde marzo de 2014 [12]. En la figura 2.30 se observa la particular forma de la cabeza de este tren.



Figura 2.30 - Convoy de la serie E6 de Shinkansen

- CAF: Tecnología SIBI

La compañía española ha desarrollado un sistema de basculación activa, cuyo primer test se realizó en 1990. Consiste en un sistema que bascula la caja del vehículo en las curvas. Se caracteriza por ser un sistema que tiene en memoria el trazado que va a realizar el tren. Además, mediante una serie de sensores y el apoyo de un sistema GPS calcula su posición exacta a lo largo del trazado. Según esta información los actuadores inclinan la caja del vehículo para permitir una mayor velocidad en curva manteniendo el nivel de confort. Actualmente los trenes de las serie 598 y 594 (ver figura 2.31), operados por Renfe, disponen de esta tecnología [13].



Figura 2.31 - Convoy de la serie 598 de Renfe

3. Control

Para entender bien qué es el control basado en lógica borrosa, es fundamental comprender primero en qué consiste el control.

3.1 Control

El control es la regulación, manual o automática, sobre un sistema. Mediante el esquema de la figura 3.1, en el que se representa un control de lazo cerrado, se puede comprender mejor este concepto.

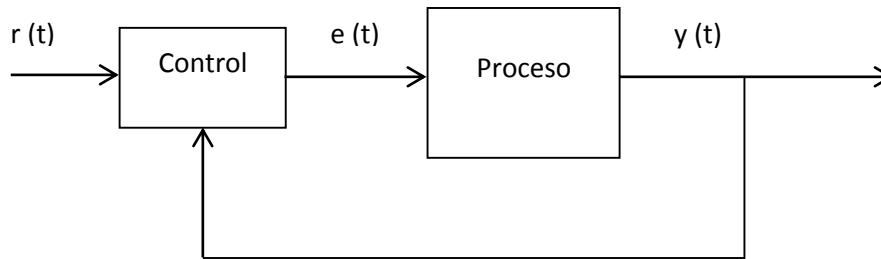


Figura 3.1 - Diagrama de bloques del control en lazo cerrado de un proceso

En todo proceso de control, existe un elemento a ser controlado. Este elemento proporciona una señal de salida $y(t)$ que se reenvía al controlador, que junto con el valor de referencia $r(t)$ establece una señal de entrada $e(t)$ que actúa sobre el proceso. Un ejemplo representativo es el sistema de control de crucero en un coche. El conductor establece la velocidad a la que desea que vaya el vehículo. El controlador tratará de acercarse a ese valor, según la velocidad a la que circule el vehículo en cada momento debido a las características de la vía por la que circula. Si la velocidad de referencia es de 100km/h y el automóvil comienza a recorrer un tramo con una cierta inclinación, el controlador detectará este cambio, y actuará sobre el acelerador, manteniendo así la velocidad deseada. Sin este sistema de control, el conductor vería como se reduce la velocidad del vehículo si no actúa sobre el acelerador a tiempo.

En este caso se trata un ejemplo de control en lazo cerrado, es decir, con realimentación negativa. Se utiliza el valor de la variable de salida para calcular el valor de la variable de entrada. Se actúa por tanto sobre ambas señales. Sin embargo, existe una alternativa que es el control en lazo abierto, en el cual sólo se actúa sobre la señal de entrada. Dado que el control en lógica borrosa utiliza realimentación negativa, este último tipo de control no se describe en el presente proyecto.

Existe una serie de etapas a la hora de diseñar un controlador para un determinado proceso.

- **Modelo matemático**

Para controlar un proceso es muy importante entender ese proceso, su funcionamiento y la base sobre la que se fundamenta. Para definir el modelo, se puede recurrir a dos alternativas. Una de ellas, consiste en utilizar los principios físicos que rigen el proceso. A partir de las ecuaciones ya conocidas, será más o menos sencillo establecer el modelo del controlador. Otra opción es basar el modelo en los datos reales del proceso, de la

planta o del vehículo, por ejemplo. Muchas veces, la mejor solución resulta de combinar las dos anteriores. Primero se establecen las ecuaciones diferenciales que gobiernen el proceso y después, a partir de los datos obtenidos experimentalmente se trata de fijar unos parámetros o funciones para el modelo del controlador.

El modelo que se defina no siempre será exacto. Por tanto, existen modelos más o menos representativos y todo depende de lo que se necesite en cada caso. Como en cualquier diseño ingenieril, se deberá llegar a un compromiso entre calidad y coste. En ingeniería de control se tiene muy presente este aspecto y por ello, se busca un modelo que sea lo suficientemente bueno para que su coste no sea elevado.

La linealidad del modelo es otro punto a destacar. Las no-linealidades deben ser tenidas en cuenta, pues el ingeniero pretende determinar la estabilidad del sistema y tiene que conocer, por ejemplo, si las variables que ha elegido son “controlables” y si el control tendrá el efecto requerido sobre la salida del sistema.

▪ Factores que influyen en el diseño del controlador

El ingeniero buscará satisfacer unas especificaciones para el controlador. Decidir entre lazo abierto o lazo cerrado será clave y además, habrá que tener en cuenta si el proceso será controlable con un tipo u otro de control. En el caso del control de cruce en un vehículo automóvil no tiene sentido utilizar control en lazo abierto, pues se requiere información de la velocidad del vehículo en cada instante. Para el control en lazo cerrado estos son algunos de los factores a tener en cuenta en el proceso de diseño.

- Capacidad para rechazar ruido: en el caso de un vehículo, que el controlador sea capaz de disminuir el efecto de variaciones en el viento o en el firme de la carretera.
- Insensibilidad ante variaciones en los parámetros del sistema: en el caso del vehículo, que el controlador compense el efecto de aumentar el número de personas o de carga.
- Estabilidad: el controlador debe poder converger en un valor.
- Tiempo para estabilidad: hace referencia al tiempo que transcurre hasta que se converge en el valor deseado.
- Precisión ante cambios en el valor de referencia: en el caso del vehículo, si la velocidad deseada sube un 20%, en qué cantidad se sobrepasa la nueva velocidad deseada.
- Error: diferencia entre el valor deseado y el valor que ha proporcionado el controlador.

Estas características sirven por tanto, para definir las especificaciones técnicas de un controlador y hablan de la calidad del mismo. Sin embargo, los aspectos que se presentan a continuación son igual, y en algunos casos, de mayor importancia a la hora de diseñar un controlador:

- Coste: cuánto dinero supone el desarrollo del diseño y cuánto tiempo requerirá.
- Complejidad computacional: referente a los recursos computacionales que requiere el controlador.
- Fabricabilidad: habrá de tenerse en cuenta que el hardware pueda ser fabricado y que el controlador no tenga unos requisitos extremadamente exigentes.

- Fiabilidad: referente a la tasa de fallos del controlador una vez puesto en servicio.
- Mantenimiento: tendrá que diseñarse pensando en si luego será fácil hacer los cambios o ajustes pertinentes.
- Adaptabilidad: será interesante poder utilizar el modelo del controlador para otros casos distintos, sin tener que hacer grandes cambios.

▪ Diseño del controlador

Existen numerosos métodos para la fase de diseño de un controlador. Algunos de estos son el PID (Control proporcional-integral-derivativo), control clásico, métodos espacio-tiempo, control óptimo, control robusto, métodos no-lineales, control adaptativo, control estocástico o sistemas de eventos discretos.

▪ Análisis y evaluación

Esta fase consiste en evaluar el funcionamiento y en un análisis del controlador. Verificar el correcto funcionamiento del proceso de control es la forma de asegurar que se alcanzan los requisitos preestablecidos. Este paso es especialmente importante en aplicaciones críticas, como por ejemplo, sistemas de seguridad. No es lo mismo analizar y evaluar una lavadora que un sistema de control en un avión o en una central nuclear. Para el avión y la central nuclear el examen debe ser muy exhaustivo pues un fallo provocaría pérdida de vidas, mientras que en la lavadora no ocasionaría más que una situación desagradable para el fabricante o vendedor.

Se puede hablar de tres vías a la hora de evaluar un controlador:

- Análisis matemático: consiste en probar que el sistema es estable, que es controlable y que cumple las especificaciones, basándose en modelos formales.
- Análisis basado en simulaciones: se trata de desarrollar un modelo de simulación basado en la física del sistema.
- Análisis empíricos: es el método de mayor coste y lleva asociado una probabilidad de fallo importante, pues consiste en representar el modelo y examinarlo en condiciones de servicio.

En conclusión, el control a partir de modelos tiene una serie de desventajas. Principalmente, la dificultad de modelar y representar sistemas de la realidad hace que sea muy costoso desarrollar un sistema de control. Además, en algunos casos, un incremento sustancial del coste en el desarrollo de este modelo no garantiza una mejora extraordinaria en el resultado. Por tanto, en casos como el de la suspensión de un vehículo ferroviario, que supone un sistema altamente no lineal, parece adecuado recurrir a otro tipo de control. En este punto entra en juego la lógica borrosa, una alternativa interesante como se detalla a continuación [14].

3.2 Estrategias de control

Existen varias estrategias de control aplicadas e implementadas en suspensiones activas y semi-activas en vehículos. Se pueden clasificar en dos tipos: las metodologías de control convencional y las de control inteligente.

- Metodologías de control convencional

Control PID

Los controladores PID (Proporcional Integral Derivativo) son de los más utilizados en sistemas de control industriales. Es un sistema de control de lazo cerrado. La estrategia de control que utiliza consiste en corregir el error entre el valor de salida del sistema y el valor de referencia, para proporcionar un valor de entrada mejorado. Siendo $u(t)$ la señal de entrada al sistema, $r(t)$ la señal de referencia, $y(t)$ la señal de salida del sistema y $e(t)$ el error representado por: $e(t) = r(t) - y(t)$, la ecuación que define la señal de entrada es la expresión (1).

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

El diseño de este tipo de controladores reside en los coeficientes K_P , K_I y K_D , que son los coeficientes del controlador proporcional, integral y derivativo respectivamente. En el esquema de la figura 3.2 se muestra el funcionamiento de un controlador de este tipo. Este tipo de control es simple y a la vez robusto.

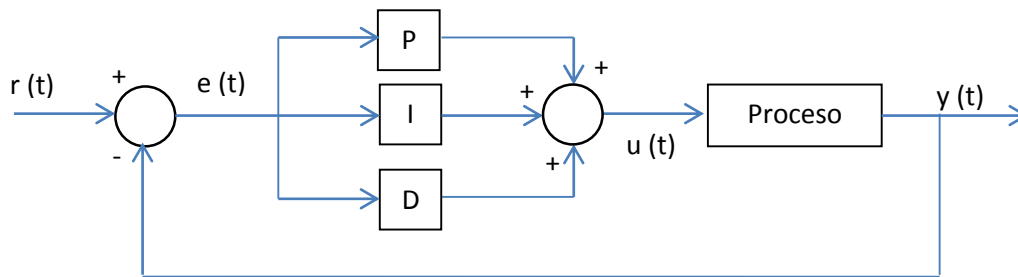


Figura 3.2 - Diagrama de bloques de controlador PID

Sky-hook

Uno de los controladores más utilizados en suspensiones activas ferroviarias es el tipo *Sky-hook*. Su nombre describe al amortiguador como si estuviera suspendido del cielo. Se fundamenta en que la amortiguación está referenciada a un punto ficticio, en vez de al suelo. La ventaja de este tipo de controlador reside en la siguiente explicación.

En la figura 3.3 se muestra un sistema de amortiguación convencional frente a un sistema de amortiguamiento *sky-hook*. La segunda ley de Newton se puede expresar para la suspensión pasiva y la suspensión *sky-hook* según las expresiones (2) y (3) respectivamente.

$$m\ddot{z} = (\dot{z}_g - \dot{z}_m)c + (z_g - z_m)k \quad (2)$$

$$m\ddot{z} = -\dot{z}_m c + (z_g - z_m)k \quad (3)$$

Siendo las funciones de transferencia para la suspensión pasiva y la suspensión *sky-hook* como muestran las expresiones (4) y (5) respectivamente

$$G_{pasivo} = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k} \quad (4)$$

$$G_{sky-hook} = \frac{k}{ms^2 + c_{sky}s + k} \quad (5)$$

Dado que en la función de transferencia para el caso *sky-hook* no presenta el término de amortiguamiento del suelo, el aislamiento de las altas frecuencias debidas a las irregularidades de la vía resulta más sencillo.

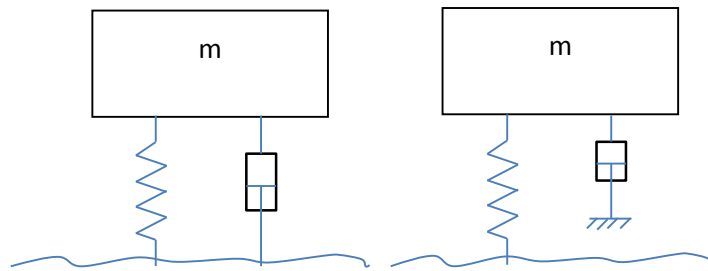


Figura 3.3 - Esquema suspensión pasiva vs amortiguador sky-hook

La implementación práctica de este controlador equivale a someter a la señal integrada de la aceleración a un filtro paso alto, para después multiplicarla por el coeficiente de amortiguamiento *sky-hook*. Con esto, se consigue la fuerza proporcionada por el actuador.

Es la metodología principal en aplicación ferroviaria cuyo máximo exponente son los trenes japoneses Shinkansen, como se comentó en el apartado 2.4.

Control robusto o control H_∞

El control robusto consiste en proponer un controlador que resuelva un problema de optimización. Para la configuración en lazo cerrado de la figura 3.4 el problema de optimización podría ser el que muestra la expresión (6).

$$\|G_c\|_\infty = \max \bar{\sigma}(G_c(i\omega)) < \gamma \quad (6)$$

Donde γ es una condición de contorno definida, y G_c es la función de transferencia del sistema de lazo cerrado. Esta estrategia de control trata de encontrar un controlador que minimice la norma del denominador H_∞ . Las ventajas que presenta el H_∞ es su robusta estabilidad. Sin embargo presenta una desventaja y es que tiende a soluciones con un número de orden elevado, alcanzando un grado de complejidad excesivo.

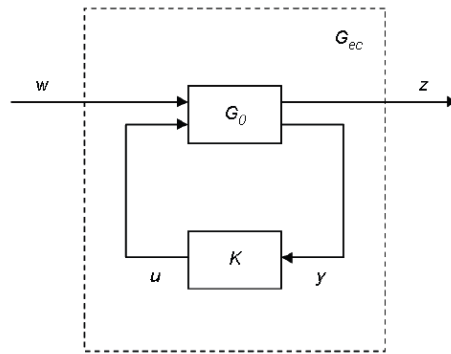


Figura 3.4 - Ejemplo de control en lazo cerrado

Este tipo de control se ha desarrollado principalmente para suspensiones de vehículos automóviles, aunque los trenes de la serie E2 y E3 de Shinkansen (Japón) están en servicio desde 2002 con un sistema de suspensión activa con control H_{∞} [4].

Control óptimo

Consiste en la optimización de un sistema con al menos una función de costo (índice de rendimiento) que satisface las restricciones dadas por ecuaciones de estado. Y se clasifican en control lineal cuadrático (LQ), en el caso de que el sistema lineal use una función cuadrática en la optimización; y en control lineal cuadrático gaussiano (LQG) que se caracteriza por incorporar, en el control LQ, un filtro Kalman [5].

■ Metodologías de control inteligente

Las metodologías de control anteriores se basan en modelos matemáticos que no proporcionan buenos resultados ante sistemas complejos y multivariables, como el caso de un vehículo ferroviario, altamente no lineal, con incertidumbres e imprecisiones. Por ello surge el control inteligente, un tipo de control que intenta emular el comportamiento humano, a través de la interpretación de la realidad (mediante unas reglas preestablecidas), la codificación de la información, el razonamiento e inferencia y por último, el aprendizaje.

Entre los tipos de control inteligente destacan el control borroso o control “fuzzy”, las redes neuronales o el control basado en algoritmos evolutivos y bioinspirados. En el siguiente apartado se desarrolla en profundidad el primer tipo citado: el control borroso, ya que es la metodología utilizada en el presente proyecto para mejorar el confort del vehículo ferroviario [5].

4. Control borroso

4.1. Introducción

El control borroso o *fuzzy control* consiste en un modo diferente de gobernar un proceso. En muchos casos, aún con un modelo de mucha precisión, no se consigue alcanzar la totalidad de las especificaciones. Por otro lado, no se tiene la certeza de que el modelo matemático sea más importante que la experiencia del diseñador o viceversa. Sin embargo existen estudios como los de Lofti Zadeh, que demuestran que la experiencia prevalece sobre cualquier modelo matemático, siempre y cuando no se exija una precisión extremadamente elevada. Zadeh propuso la lógica borrosa como método de control y es la que se desarrolla en los siguientes apartados [14].

4.2. Lógica borrosa

La lógica borrosa trata la realidad de manera que se acerca al modo de actuar de un humano. Para comprender mejor esto es útil recurrir a un ejemplo: Se quiere hacer un estudio de la población de una ciudad. A la hora de clasificar a las personas se utiliza la edad como variable de estudio. Se establecen dos grupos de personas: jóvenes, entre 0 y 20 años; y adultos a partir de 21 años. La lógica borrosa lo que se plantea es lo siguiente: ¿Por qué una persona el día antes de cumplir los 20 es joven, y al día siguiente es un adulto? ¿Tan sólo un instante separa a jóvenes de adultos? No es así, pues desde un punto de vista una persona de 28 años sigue considerándose joven, o en el caso opuesto, una persona de 25 puede ser considerada como adulta.

■ Esquema de funcionamiento

El control borroso proporciona una metodología para representar, modelar e implementar el conocimiento humano, basado en la experiencia, sobre cómo controlar un proceso. En el esquema de la figura 4.1 se muestra el modo de funcionamiento de un controlador borroso.

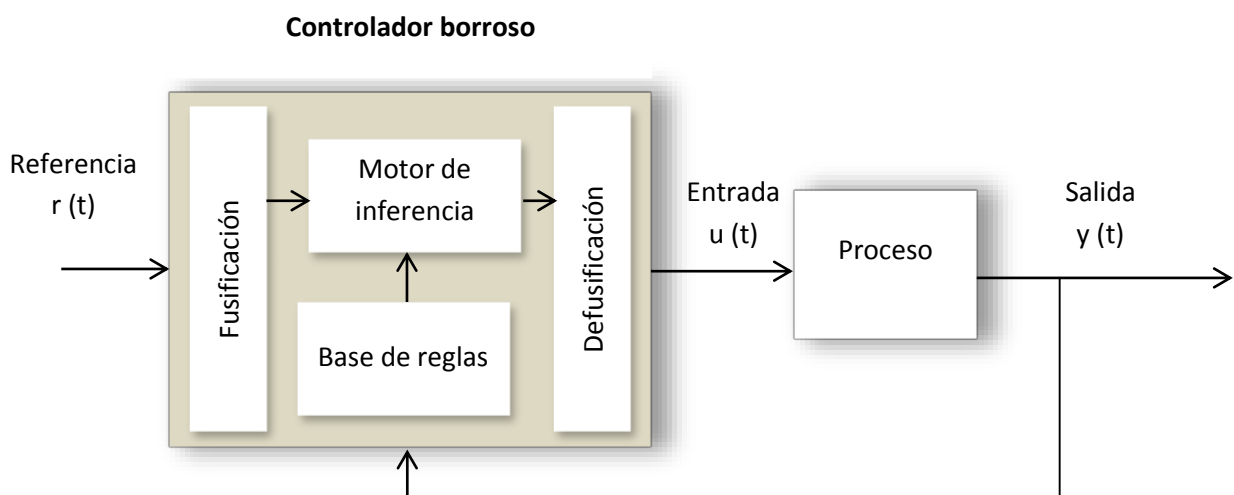


Figura 4.1 - Diagrama de bloques de un controlador borroso

Un controlador borroso consta de varias partes. Por un lado la base de reglas, fundamentadas en el conocimiento del experto, sobre las que se apoya el motor de inferencia. Son reglas del tipo: “**si** A alto **y** B alto, **entonces** C alto”. Este motor o mecanismo de inferencia es el que decide qué valor ha de tener la variable de entrada al proceso. El controlador borroso trabaja con un lenguaje diferente, aunque cercano al cotidiano, y por ello requiere dos traductores. Primero, para traducir las entradas al controlador, se dispone el fusificador. Tras la toma de decisión del motor de inferencia se tiene que traducir al lenguaje cotidiano de nuevo esta información, función que realiza el defusificador.

Según esto, se puede definir al controlador borroso como un decisor artificial que opera en sistemas de lazo cerrado en tiempo real. Recoge la salida del sistema, compara con la de referencia y decide cuál es su entrada.

■ Entradas y salidas

El controlador más utilizado es el que presenta dos entradas y una salida, sin embargo la duda no surge a la hora de elegir el número de entradas o salidas, sino en qué entradas o salidas seleccionar. Esta decisión se toma en base al conocimiento del caso, a la experiencia y en cierto grado a la intuición. El conocimiento de un determinado proceso es el mejor ingrediente para diseñar bien un controlador. Por otro lado, la experiencia es clave, ya que el diseñador podrá conseguir un mejor diseño si se apoya en estudios o ensayos similares. Por último, la intuición juega un papel importante, puesto que en muchos casos no se puede tomar una decisión fácilmente, y la experiencia de otros casos dará pistas al diseñador acerca de qué variables elegir.

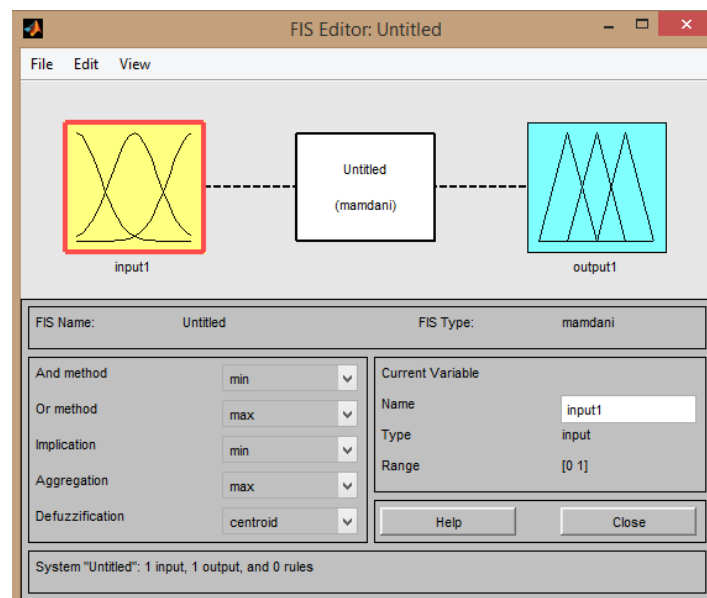


Figura 4.2 - Ventana Simulink. Controlador borroso.

Simulink mediante su módulo *Fuzzy* permite diseñar un controlador de este tipo. En la figura 4.2 se observa una ventana donde se pueden elegir el número de entradas y salidas del controlador, entre otras opciones. En el caso de la figura 4.2, tan sólo aparece una entrada (input1) y una salida (output1).

▪ Base de reglas

Como se ha comentado en el primer apartado del punto 4.2, las reglas serán similares a la siguiente sentencia: “**si premisa, entonces consecuencia**” La premisa se relaciona con las variables de entrada, y la consecuencia con la variable de salida. La notación en las reglas no es relevante para el proceso de control, no afecta a la solución, y por ello se utiliza una notación que sea cómoda para el diseñador y representativa del proceso. En lógica borrosa las entradas y salidas se denominan variables lingüísticas, y a partir de ellas se construyen las reglas. Las reglas suelen representar todas las combinaciones posibles entre las variables de entrada y salida, de manera que la totalidad de las situaciones que se puedan dar en un sistema, queden representadas. Concretamente, las reglas consisten en una combinación de los conjuntos borrosos de cada variable.

Para cada variable lingüística se establecen unos niveles, denominados “conjuntos borrosos” definidos por un “valor lingüístico” Por ejemplo, para la variable lingüística *velocidad* se pueden establecer los siguientes conjuntos borrosos:

- NG: Negativo Grande
- NP: Negativo Pequeño
- Z: cero (*Zero*)
- PP: Positivo Pequeño
- PG: Positivo Grande

Siendo un conjunto borroso, el rango de valores; y el valor lingüístico, el nombre del conjunto borroso.

Como se ha explicado antes, la notación NG, NP, Z, etc depende del diseñador. Por otro lado, los conjuntos no tienen por qué ser del mismo tamaño, quizás haya regiones del universo de discurso en las que se requiera mayor precisión y por ello, se dispongan en esa zona más conjuntos borrosos. Además, cuantos más conjuntos mayor precisión se tendrá en los resultados. La razón de definir estos niveles es el pilar de la lógica borrosa. Se trata de dividir el valor de una variable en clases cualitativas y dejar a un lado modelos matemáticos. Los tipos de conjuntos se desarrollan más adelante.

Las premisas se relacionan entre sí mediante nexos. Estos nexos pueden ser del tipo conjunción “y” (AND) que implica calcular la solución mediante dos métodos: el mínimo o el producto de los valores de pertenencia a los distintos conjuntos borrosos. También pueden ser del tipo intersección “o” (OR), que se resuelven con el máximo o la suma algebraica. Otra operación muy común es la negación (NOT), que consiste en considerar todo el rango de valores que no pertenezcan al conjunto borroso negado.

Estas reglas no son del todo precisas, pues no se fundamentan en modelos matemáticos. Son ideas abstractas, pero simples. Sin embargo, este nivel de abstracción es un entorno cómodo para una persona, en términos de control de un sistema, y que proporciona resultados muy buenos en comparación a los recursos utilizados.

■ Funciones de pertenencia: Cuantificación del conocimiento

Una vez se han definido las variables lingüísticas con sus respectivos niveles y las reglas que las relacionan, el siguiente paso es utilizar la lógica borrosa para llevar a cabo el control automático. Para ello es necesario definir lo que se denomina “Función de pertenencia”. En ella se reflejan las diferentes variables lingüísticas de manera cuantitativa. En la figura 4.3 se observa la representación de varias funciones de pertenencia.

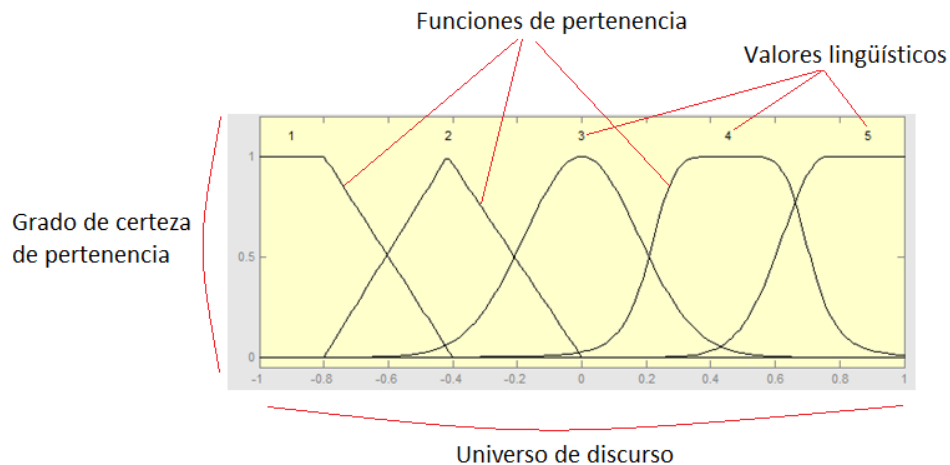


Figura 4.3 - Representación gráfica de las funciones de pertenencia

En esta representación aparecen indicados varios conceptos importantes. Existe una función de pertenencia por cada variable considerada, ya sea de entrada o de salida. El rango de valores de cada variable queda definido en lo que se denomina “universo de discurso” y corresponde al eje horizontal. Por otro lado, el eje vertical representa el grado de certeza de pertenencia a cada valor lingüístico de la variable. Este grado de pertenencia es un intervalo comprendido entre 0 y 1, siendo el 0 el valor que indica que ese valor del universo de discurso no pertenece a un valor lingüístico determinado, mientras que el 1 indica que el grado de pertenencia a ese valor lingüístico es del 100%. Por último, los valores lingüísticos agrupan un conjunto de valores, a ese conjunto se le denomina “conjunto borroso o difuso”. En las figuras 4.4 y 4.5 se distinguen 5 conjuntos borrosos diferentes, de izquierda a derecha conjuntos borrosos del tipo: trapezoidal, triangular, gaussiano, en forma de campana y gaussiano para extremo.

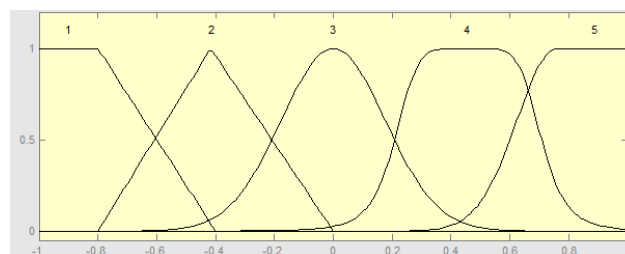


Figura 4.4 - Tipos de funciones de pertenencia

En ellas queda cuantificado el conocimiento, pues a cada valor lingüístico se le ha asignado una parte del universo de discurso. Cuantificar el conocimiento significa definir el grado de pertenencia de un determinado valor de la variable a una clase o valor lingüístico.

Existen distintos tipos de funciones de pertenencia. La elección de un tipo u otro atiende principalmente a la subjetividad del ingeniero y al valor lingüístico que se evalúe.

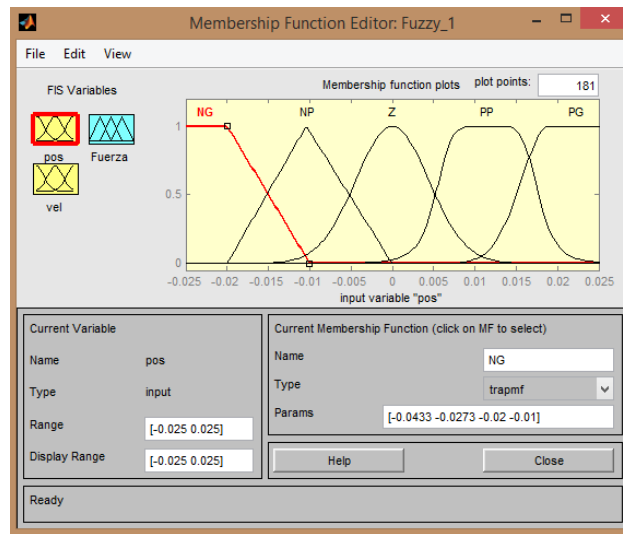


Figura 4.5 - Tipos de funciones de pertenencia

■ Fusificación

Como indicaba la figura 4.1 (esquema del controlador borroso) los datos de entrada al controlador borroso se ven sometidos a una traducción. Esta traducción al “lenguaje borroso” la realiza el fusificador. Este proceso consiste en pasar de un dato de velocidad de 60 km/h por ejemplo, a un grado de pertenencia de 0,8 al conjunto borroso PM (Positivo mediano). Esto puede verse gráficamente en la figura 4.6.

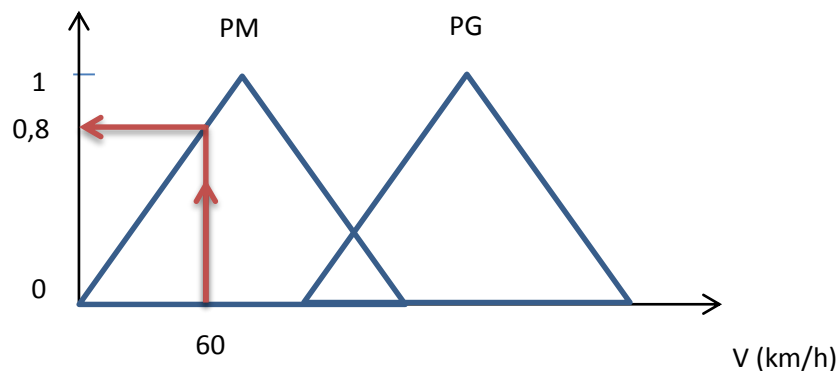


Figura 4.6 – Fusificación. Representación gráfica

■ Proceso de inferencia

El proceso de inferencia tiene dos pasos. El primero consiste en determinar las reglas que se han de usar. Se comparan las premisas de todas las reglas con las entradas del controlador, para definir las reglas que intervienen en cada caso. Dependiendo de la distribución de funciones de pertenencia que se haya dispuesto, podrán intervenir un mayor o menor número de reglas.

El segundo paso consiste en ejecutar esas reglas y obtener las conclusiones. En el caso de que intervengan varias reglas, se analizan cada una de ellas por separado para después combinar las conclusiones de las mismas obteniéndose así un valor de salida determinado.

▪ Defusificación

El proceso de defusificación es el inverso a la fusificación. Se vuelve a traducir al lenguaje ordinario, pasando de un valor de certeza de pertenencia a un conjunto borroso, a un valor para la variable de salida. En la figura 4.7 se observa el proceso que realiza el defusificador.

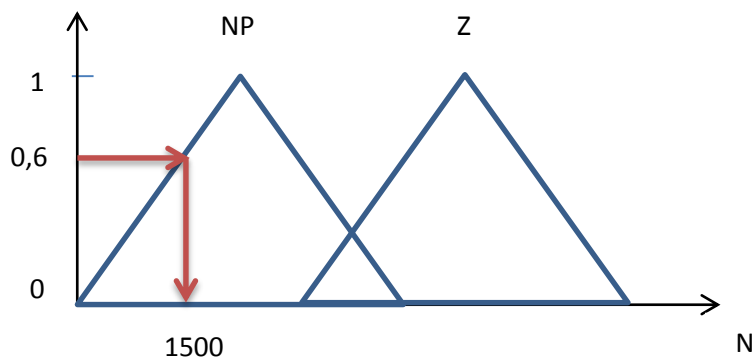


Figura 4.7 - Defusificación. Representación gráfica

Esta vez, la traducción ha consistido en pasar de un grado de pertenencia de 0,6 al conjunto borroso NP (Negativo pequeño) a un valor de 1500 N de valor de salida.

Sin embargo no siempre es tan sencillo este último paso, pues depende del número de reglas que intervengan. Si por ejemplo intervienen 2 reglas, existirán dos posibles valores para la variable de salida, por ejemplo 1600 y 1800 N. Esto supone un problema, pues tan sólo se ha de obtener un único valor para la variable de salida. En los casos en los que intervengan dos o más reglas, se tiene que llevar a cabo un proceso que combine esas reglas de manera que se obtenga un único valor de salida. Los métodos para combinar reglas son varios y en el ejemplo del apartado siguiente se detalla uno de ellos [14].

▪ Ejemplo

Se supone un caso en el que se quiere controlar la velocidad de crucero de un vehículo automóvil. Las variables de entrada consideradas son el error (diferencia entre la velocidad real y la velocidad de referencia) y la variabilidad de este error (la derivada del error con respecto al tiempo). La variable de salida es la cantidad de aire que se permite entrar al motor, representada por el ángulo de apertura de la válvula de obturación. Se definen los siguientes conjuntos borrosos con sus correspondientes denotaciones (valores lingüísticos):

- NG: negativo grande
- NP: negativo pequeño
- Z: cero
- PP: positivo pequeño
- PG: positivo grande

Estos conjuntos borrosos se distribuyen a través de las funciones de transferencia, como se muestra en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10.

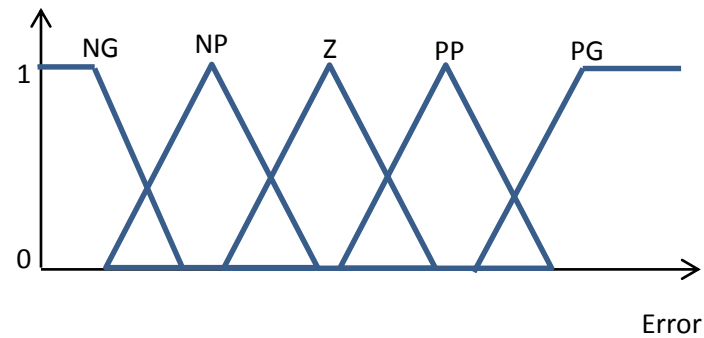


Figura 4.8 - Conjuntos borrosos para la variable "Error"

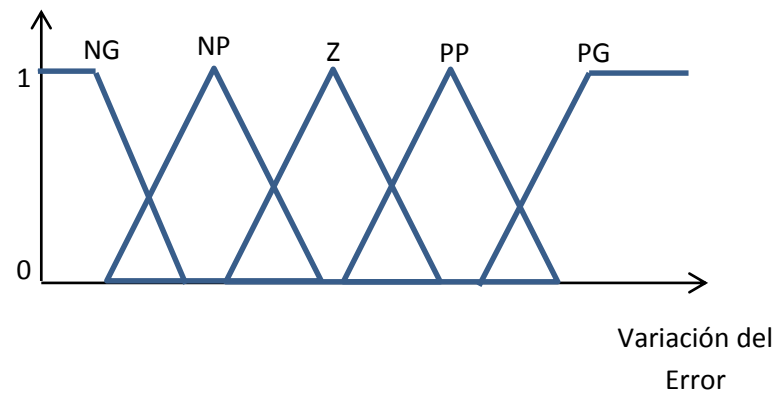


Figura 4.9 - Conjuntos borrosos para la variable "Variación del Error"

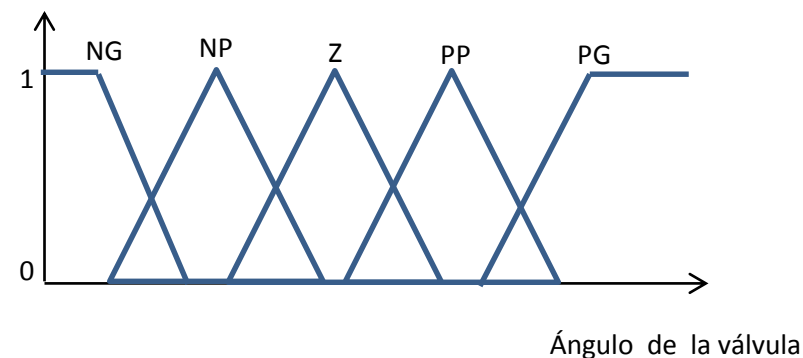


Figura 4.10 - Conjuntos borrosos para la variable "Ángulo de salida"

Se marca como velocidad de referencia 100 km/h. En un instante dado, la velocidad del vehículo es de 100 km/h. El error por tanto, es de 0 km/h y se supone que la variación del error es de 12. Si se lleva a cabo el proceso de fusificación, se obtienen los valores de pertenencia a los distintos grupos borrosos para las entradas, según se muestra en las figuras 4.11 y 4.12.

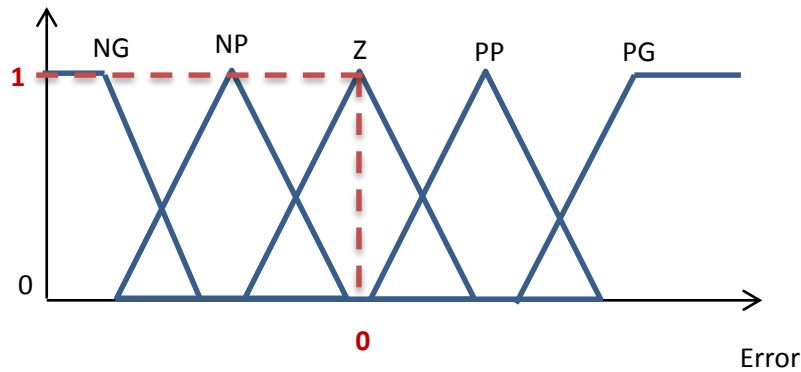


Figura 4.11 - Proceso de fusificación. Representación gráfica.

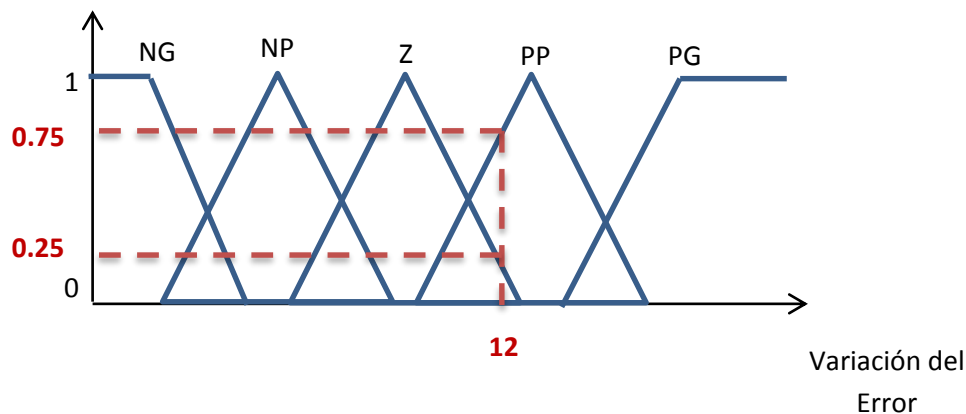


Figura 4.12 - Proceso de defusificación. Representación gráfica.

Para la variable *error* se obtiene un grado de pertenencia de 1 al conjunto borroso Z, mientras que para la variable *variación del error* se obtiene un grado de pertenencia de 0,75 al conjunto borroso PP y de 0,25 al conjunto Z.

Según lo explicado anteriormente, una vez hecha la traducción al lenguaje del controlador borroso, se procede con la etapa de inferencia. En primer lugar se determinan las reglas que intervienen para estos datos. Supuesta declarada la lista de reglas, se llega a la conclusión de que las dos reglas (dos reglas debido a que se ha obtenido pertenencia a dos conjuntos borrosos en una misma variable) que intervienen son:

- i. “Si *error* es **Z** y *variación del error* es **Z**, entonces el *ángulo de la válvula* es **Z**”
- ii. “Si *error* es **Z** y *variación del error* es **PP**, entonces el *ángulo de la válvula* es **NP**”

Para la regla *i* se obtiene que el grado de pertenencia al conjunto Z para la variable *ángulo del válvula* es de 0,25 según muestra la expresión (7).

$$\min\{1, 0.25\} = 0.25 \quad (7)$$

El 1 es debido a la variable *error* y el 0.25 a la variable *variación del error*. En este caso se ha utilizado el mínimo de los dos valores, pero como se explicó anteriormente también se podía haber hecho el producto de ambos valores (que en este caso hubiera dado el mismo resultado). Por tanto en el conjunto borroso Z de la variable de salida el grado de pertenencia es el mostrado en la figura 4.13.

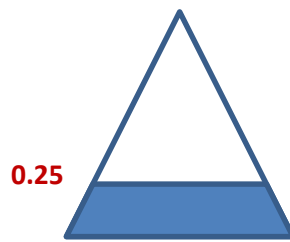


Figura 4.13 - Grado de pertenencia al conjunto borroso Z para la variable "Ángulo de la válvula" (regla i)

Para la regla *ii* se obtiene que el grado de pertenencia al conjunto NP para la variable *ángulo del válvula* es de 0,75 según muestra la expresión (8).

$$\min\{1, 0.75\} = 0.75 \quad (8)$$

El 1 es debido a la variable *error* y el 0.75 a la variable *variación del error*. Por tanto en el conjunto borroso Z de la variable de salida es el mostrado en la figura 4.14.

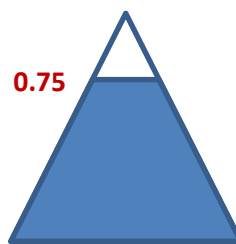


Figura 4.14 - Grado de pertenencia al conjunto borroso NP para la variable "Ángulo de la válvula" (regla ii)

Dado que son dos reglas las que intervienen, se tienen 2 grados de pertenencia distintos. En este caso, se ha elegido el método del CDG (centro de gravedad) para calcular el valor de la variable de salida. Consiste en calcular el centro de gravedad de la superficie resultante de la solución. Dado que la regla presenta la conjunción "y" la superficie resultante es la que muestra la figura 4.15.

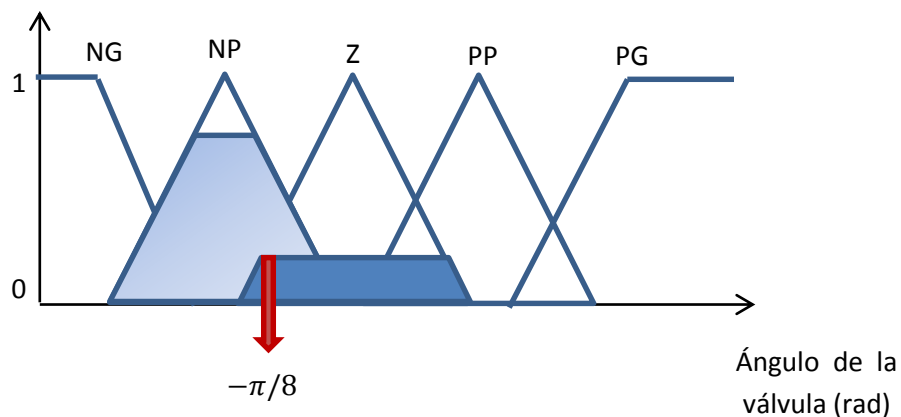


Figura 4.15 - Obtención gráfica del valor para la variable de salida. Método CDG.

Se supone que este cálculo da como resultado un valor de $-\pi/8$ radianes. Se ha llevado a cabo el último paso tras el proceso de inferencia, la defusificación, que ha consistido en traducir la conclusión obtenida a un valor para el ángulo de la válvula.

Además del método del centro de gravedad existen otros como por ejemplo el centro de sumas, el centro del área mayor o el *First-of-Maxima* (que toma el valor más pequeño del conjunto borroso con el mayor grado de pertenencia) [15].

Simulink ofrece dos métodos para resolver los problemas de lógica borrosa, Mamdani y Sugeno. Para este proyecto se ha elegido el método Mamdani por seguir la línea de estudio de anteriores proyectos fin de carrera. Por otro lado, el método de Sugeno es similar al método de Mamdani. La diferencia principal entre ambos métodos es la función de pertenencia para la variable de salida que en el método de Sugeno puede ser lineal o constante [16].

- **Áreas de aplicación**

Por último, cabe destacar que la lógica borrosa está presente en muchos sectores en los que se requiere controlar un proceso o sistema. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- **Aeronaves, naves espaciales:** control de vuelo, control del motor, sistemas de aviónica, diagnóstico de fallos, navegación, control de altitud por satélite.
- **Sistemas automáticos:** conducción, freno, aceleración.
- **Automóviles:** frenos, transmisión, suspensión, motor.
- **Ferrocarriles:** En Sendai, Japón, está operativo el modelo Series 1000 del fabricante Hitachi Ltd, que lleva incorporado un sistema ATO (Tren de operación automática). Este sistema funciona con lógica borrosa y permite acelerar y frenar de manera automática con una suavidad que un maquinista no podría ofrecer [17].
- **Sistemas de manufactura:** programación de procesos.
- **Industria energética:** nivel de potencia, distribución y estimación de la carga.
- **Control de proceso:** temperatura, presión, control de nivel, diagnóstico de fallo, columna de destilación, desalinización.
- **Robótica:** control de posición y guiado [14].

5. Software utilizado

5.1. SIMPACK

SIMPACT es el programa utilizado para simular el comportamiento dinámico del vehículo ferroviario en este proyecto. Se trata de un programa para casos tridimensionales no lineales apto para análisis vibratorios de alta frecuencia de cuerpos flexibles.

En el diseño y análisis de sistemas mecánicos y mecatrónicos, SIMPACK es de gran utilidad. Permite la optimización de los sistemas, reduce en gran medida la necesidad de fabricar físicamente prototipos, disminuye el time-to-market e incrementa la calidad y la vida útil del producto. En definitiva, este software supone una mejora en la eficiencia del proceso de desarrollo de un producto, con el consecuente ahorro de costes.

Los principales campos de aplicación son la ingeniería de automoción, ferroviaria, de motores, de turbinas eólicas, de transmisión de energía y aeronáutica.

SIMPACT permite análisis en todo el espectro de frecuencias desde ensayos estáticos y cuasi-estáticos hasta completos análisis transitorios no lineales. Es particularmente adecuado para análisis transitorios a altas frecuencias.

En cuanto al funcionamiento del programa, SIMPACK cuenta con dos partes: Preprocesamiento y Postprocesamiento.

- Preprocesador

La ventana de preprocesamiento (figura 5.1) se compone primeramente de la ventana principal, que muestra el modelo creado. En la parte superior dispone de múltiples accesos para la creación de cualquier elemento. Cada elemento que se crea aparece en el árbol de la parte derecha.

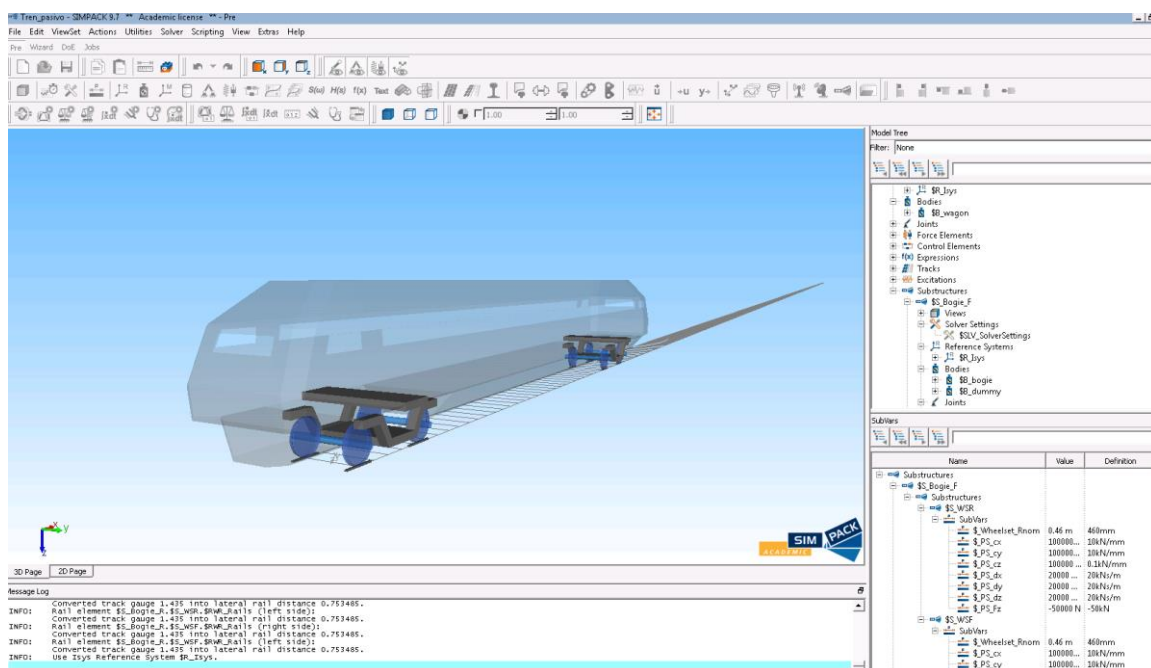


Figura 5.1 - Ventana de preprocesador de SIMPACK

Elementos

Para modelizar un determinado sistema se dispone de varios tipos de elementos que se describen a continuación:

- “Bodies”: cuerpos que constituyen el modelo. A través de su ventana de propiedades se puede modificar todo tipo de características, como la posición, dimensiones, masa, inercia y aspectos estéticos entre otros.
- “Joints”: Son elementos clave para el funcionamiento del modelo. Sirven para establecer los grados de libertad de los elementos. Cada cuerpo “body” lleva asociado una “joint” que describe su posibilidad de movimiento en el espacio.
- “Markers”: Son elementos que definen puntos en el espacio y que van asociados a un determinado cuerpo. Sirven para colocar los distintos elementos de un modelo en el espacio y asociarlos a uno u otro cuerpo del mismo.
- “Force elements”: Son elementos que proporcionan una fuerza en base a sus características técnicas. En este proyecto se han usado resortes y amortiguadores para la suspensión pasiva y actuadores para la suspensión secundaria activa.
- “Control elements”: Este tipo de elementos tienen muchas aplicaciones y categorías. Son elementos que pueden funcionar como sensores, ya sean de posición, de velocidad, como acelerómetros, etc; también permiten tratar señales de otros elementos del modelo, ya sean otros “control elements” o de otro tipo. En este proyecto se han utilizado elementos de este tipo para acelerómetros, para un integrador y para la interacción de SIMPACK con Simulink.
- “Expressions”: son elementos a través de los cuales se puede medir, tratar señales procedentes de otros elementos (operaciones matemáticas por ejemplo) y generar señales que se envíen a otros elementos, entre otros. En este proyecto se han utilizado elementos de este tipo para medir la aceleración de los extremos superiores de los amortiguadores, haciendo las veces de acelerómetro. Además se han utilizado para obtener la señal de la fuerza procedente de Simulink para enviarla a los actuadores.
- “Tracks”: estos elementos definen el camino por el que circula el vehículo. Se pueden modificar para disponer tramos rectos, curvos o las irregularidades del trazado.
- “Excitations”: permiten definir distribuciones de todo tipo para poder, como en el presente proyecto, establecer la irregularidad del perfil de la vía.
- “Substructures”: SIMPACK permite trabajar en una estructura principal y dentro de ella añadir otras subestructuras previamente creadas. Esto permite simplificar el modelo y el desarrollo del mismo. En este caso, se ha creado el conjunto ruedas-eje como primera estructura. Después, se ha creado el bogie, dentro del cual se han incluido dos subestructuras del conjunto ruedas-eje. Por último, se ha generado la

estructura principal del vehículo en la que se han incluido dos subestructuras de bogie; de manera que no ha hecho falta construir 4 conjuntos ruedas-eje ni 2 bogies.

- “Rails”: representan los raíles. Se pueden definir o tomar modelos preestablecidos por SIMPACK como el modelo UIC60.
- Rail-Wheel Pairs: Definen el contacto rueda-carril, permitiendo elegir entre varios tipos.
- Wheelsets: Una vez definidos las ruedas y los ejes, a través de estos elementos se genera un cuerpo que engloba la rueda y los ejes.
- Ejecución de la simulación

Una vez se ha definido el modelo, SIMPACK dispone de una pestaña denominada “Jobs” a través de la cual se ejecutan las simulaciones a la vez que se miden los distintos parámetros configurados. El aspecto de esta ventana es el que muestra la figura 5.2.

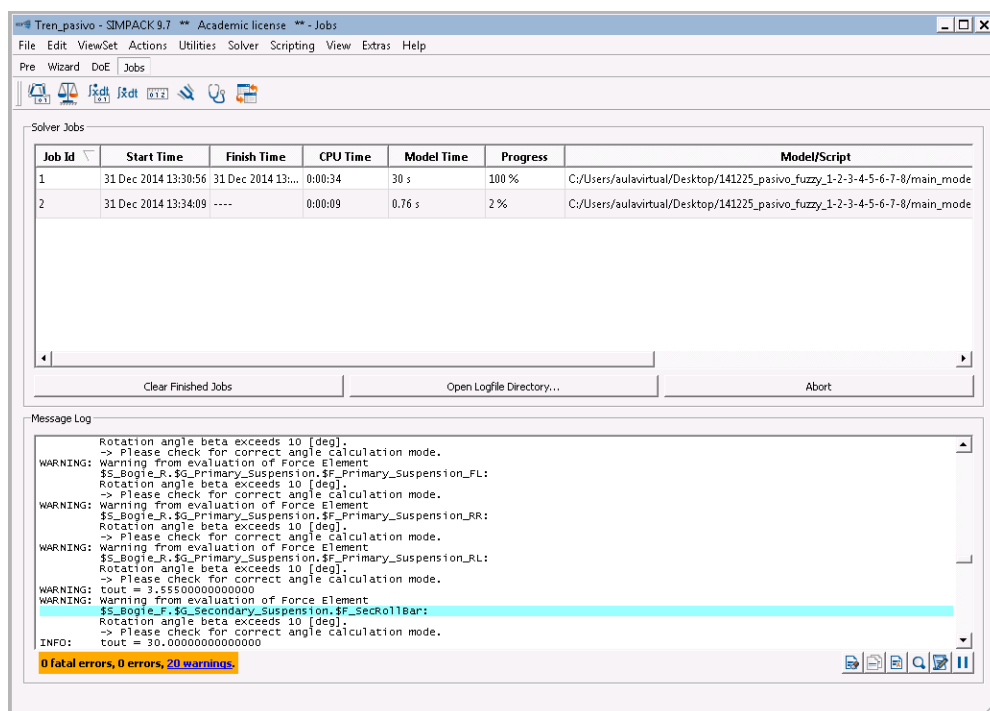


Figura 5.2 - Ventana “Jobs” de SIMPACK

Se muestra una lista con las simulaciones realizadas y algunos datos sobre las mismas como el tiempo de simulación, progreso o estado.

- Post-procesador

Los resultados generados en esta pestaña se abren con el segundo módulo que dispone SIMPACK: el “SIMPACK Post”.

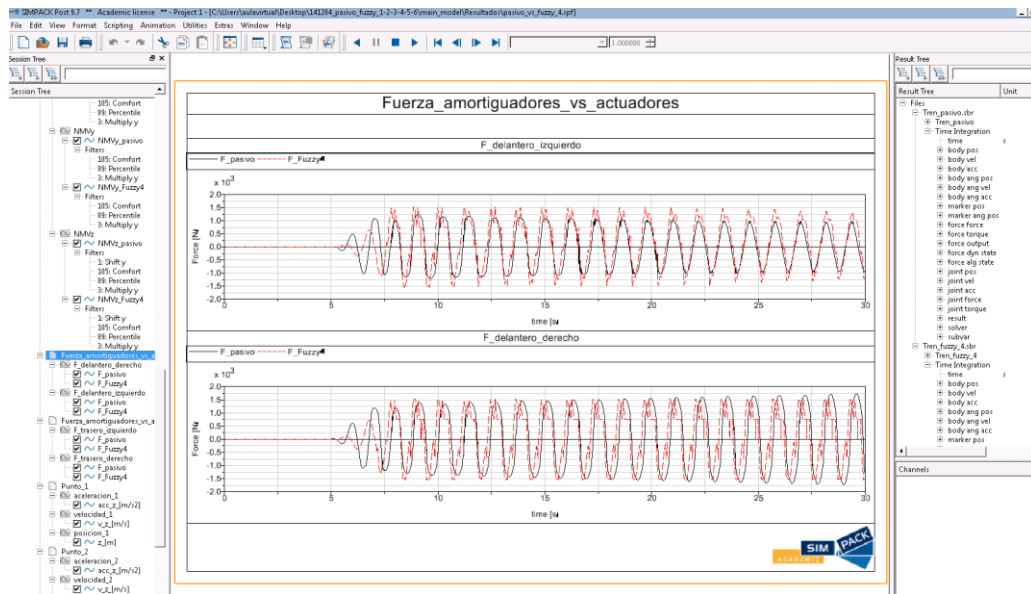


Figura 5.3 - Ventana de post-procesador de SIMPACK

Este segundo módulo permite visualizar los resultados de la simulación y sus valores numéricos. En la parte izquierda de la ventana de la figura 5.3 se muestran las gráficas que se visualizan en la ventana principal. Como herramienta adicional se pueden tratar los resultados obtenidos mediante la aplicación de filtros de todo tipo (offsets, estadísticos o frecuenciales) a las señales. Además estos resultados pueden ser exportados para su tratamiento en hojas de cálculo como Excel.

Otros softwares similares a SIMPACK son MEDYNA, ADAMS/Rail, NUCARS, VOCO, VAMPIRE o GENSYNS [18] y [19].

6. Modelo de vehículo ferroviario

6.1. Modelo del tren

En la figura 6.1 se puede observar la modelización del vehículo en SIMPACK. Consiste en un coche compuesto de 2 bogies y de 2 ejes por bogie. A continuación se detallan las partes y elementos que constituyen el modelo.

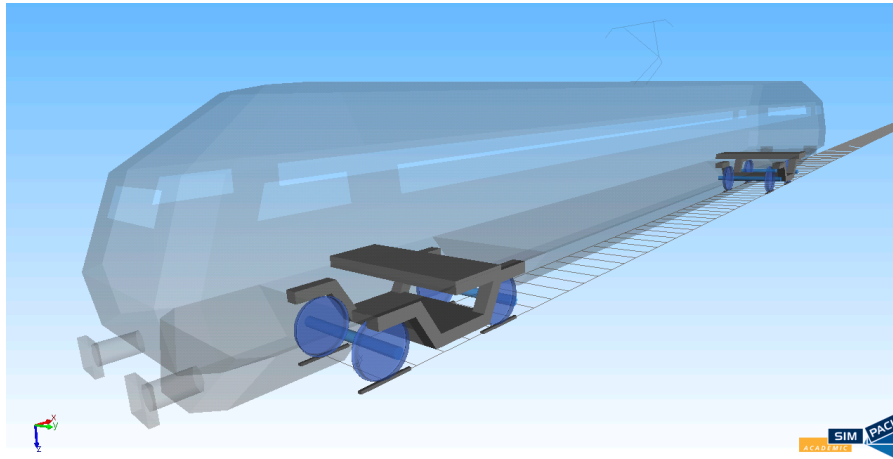


Figura 6.1 - Modelo completo tren en SIMPACK

El vehículo está compuesto por una estructura principal, la caja, y dos subestructuras, los bogies, compuestos a su vez por otras dos subestructuras cada uno, los conjuntos rueda-eje. En los siguientes apartados se describen estos elementos.

- **Conjunto rueda-eje**

El primer elemento que se crea es el conjunto rueda-eje. Se define un eje como un cilindro de acero sobre el que irán montadas las dos ruedas.

Se define el trazado que recorre el vehículo como un elemento "Track". Sobre él es necesario crear un elemento tipo "Rail", que representa los raíles sobre los que circulan las ruedas. Se ha elegido un perfil UIC60 para los mismos. La vía presenta ancho europeo, de 1435 mm.

Por otro lado, se define un elemento tipo "Rail-Wheel Pair". Este elemento es fundamental, pues recoge toda la información del eje y del contacto con el raíl. En él, se define el tipo de rueda, que en este caso se ha elegido una rueda con un radio de 460 mm. SIMPACK automáticamente dibuja la rueda con su perfil cónico como se muestra en la figura 6.2. Como segundo paso en la creación del "Rail-Wheel Pair" se tiene que definir el contacto rueda-carril. Se establece un coeficiente de fricción de 0,4 y el contacto queda definido a través de un elemento "Rail-Wheel Contact".

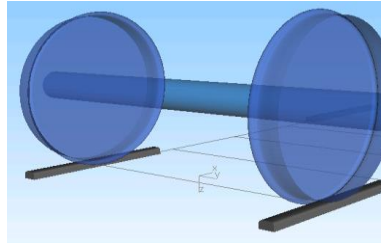


Figura 6.2 - Conjunto ruedas-eje

Por último, dado que un eje presenta dos ruedas, resta crear un elemento tipo “Wheelset” o conjunto ruedas-eje. Este elemento agrupa el eje, con las dos ruedas y con sus correspondientes contactos con los raíles.

Una vez fijados todos los parámetros correspondientes ya queda definido el primer eje en contacto con la vía. Todos los datos del conjunto rueda-eje se encuentran recogidos en el Anexo.

- **Bogie**

Se crea una nueva estructura llamada Bogie que contiene dos subestructuras. Estas subestructuras son dos ejes rodados, creados anteriormente.

Como muestra la figura 6.3, el bogie queda definido por los dos ejes montados en una estructura. Esta estructura está compuesta por dos partes. La parte inferior representa la masa semi-suspendida y está situada entre la suspensión primaria y la secundaria. La forma de este elemento se define también de manera automática por SIMPACK. En la parte superior del bogie se encuentra un elemento denominado cabezal fijo, de masa infinitésima, cuya función es facilitar la unión entre la caja y el bogie propiamente dicho.

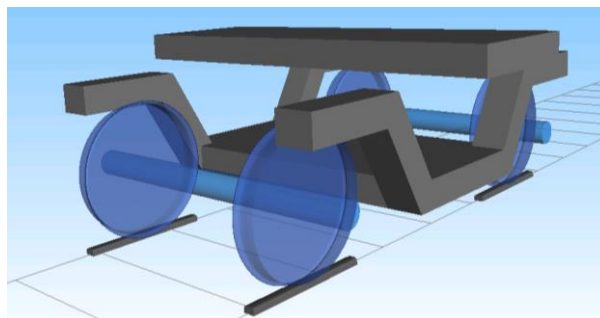


Figura 6.3 - Bogie completo

En el Anexo quedan reflejados los datos referentes a dimensiones, masas y momentos de inercia de estos elementos también.

Una vez definidos estos elementos geométricos, el siguiente paso es definir la suspensión. Para la suspensión primaria se establecen 4 resortes y 4 amortiguadores, uno por cada rueda. Para los resortes se elige un elemento de fuerza “Force element” tipo 86 y para los amortiguadores se eligen elementos de fuerza tipo 6. En la figura 6.4 se muestra la disposición de estos elementos.

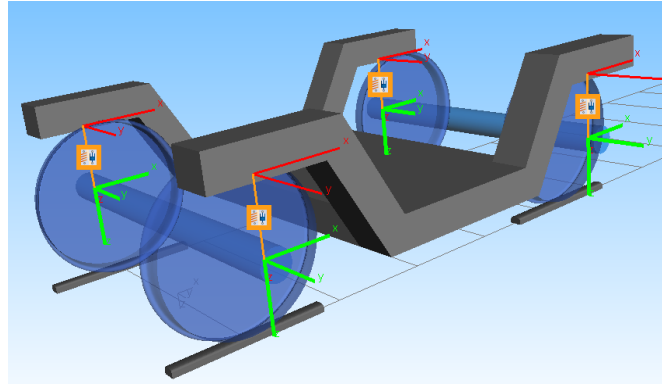


Figura 6.4 - Suspensión primaria

Para la suspensión secundaria se disponen 2 amortiguadores verticales y 2 laterales (Elemento de fuerza tipo 6), 2 resortes verticales (Elemento de fuerza tipo 79), 1 barra antitorsi3n (Elemento de fuerza tipo 13) y un Bumbstop (Elemento de fuerza tipo 5). La disposici3n de la suspensi3n secundaria se refleja en la figura 6.5.

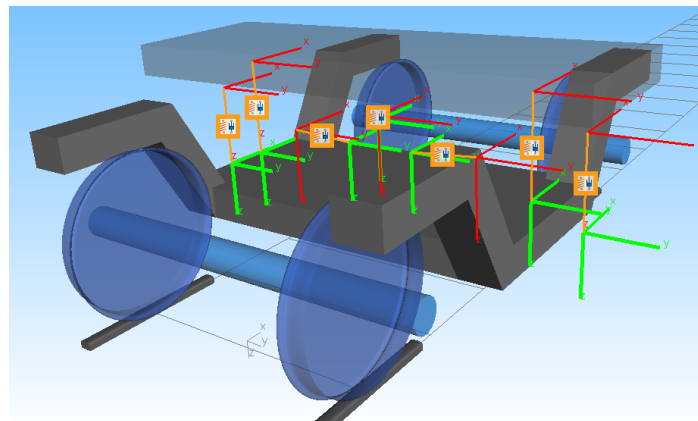


Figura 6.5 - Suspensi3n secundaria

Las caracter3sticas t3cnicas de estos elementos, se han elegido en base a la informaci3n facilitada por SIMPACK. Estos datos se encuentran recogidos en el Anexo tambi3n.

- **Suspensi3n activa**

Dado que este proyecto es un estudio de la influencia de la l3gica borrosa en un sistema de suspensi3n activa, se requiere hacer una modificaci3n para efectivamente, disponer la citada suspensi3n. De entre las configuraciones posibles que se comentaban en el apartado 2.3, se ha elegido sustituir directamente el amortiguador vertical de la suspensi3n secundaria por un actuador. Por tanto, se tienen 4 actuadores que permiten controlar la fuerza ejercida en cada instante mediante la unidad de control de l3gica borrosa. Atendiendo a la figura 6.5 los amortiguadores sustituidos por actuadores son los situados en los extremos izquierdo y derecho del bogie.

- **Modelo principal. Caja**

Por 3ltimo se crea una nueva estructura que engloba a las subestructuras anteriores (2 bogies con sus correspondientes ejes) Esta estructura consiste en un cuerpo cuya geometr3a

corresponde al tipo “Wheel Rail Cab”, que SIMPACK ofrece. Se realiza el ensamblaje de los bogies con la caja mediante “markers” situados en las “joints” de los cabezales fijos citados anteriormente, de manera que el vehículo queda ensamblado y completado.

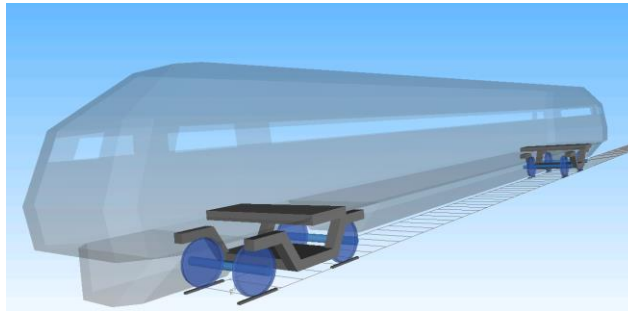


Figura 6.6 - Modelo del vehículo ferroviario

6.2. Condiciones iniciales e irregularidad de la vía

Para realizar las simulaciones se ha elegido una velocidad constante para el vehículo de 60 km/h.

En cuanto a la calidad de la vía se ha seguido la norma UNE-EN 13848-5:2009+A1 (Aplicaciones ferroviarias. Vía. Calidad de la geometría de la vía) SIMPACK ofrece la posibilidad de incluir un perfil de vía irregular. Existen distintos conceptos y parámetros a la hora de definir la calidad de una vía según la norma.

Para la evaluación de la calidad geométrica de la vía existen 3 niveles principales:

- Límite de acción inmediata (IAL): referido a los valores, que si se superan, requieren tomar medidas para reducir el riesgo de descarrilamiento a un nivel aceptable. Esto puede hacerse ya sea cerrando la línea, reduciendo la velocidad o corrigiendo la geometría de la vía.
- Límite de intervención (IL): referido a los valores que, si se superan, requieren mantenimiento correctivo con vistas a que los límites de la acción inmediata no se alcancen antes de la siguiente inspección.
- Límite de alerta (AL): referido a los valores que, si se superan, requieren que las condiciones de la geometría de la vía se analicen y se tenga en cuenta en las operaciones de mantenimiento planificadas regularmente [20].

De estos 3 niveles, se ha seleccionado el nivel de alerta por corresponder a unos datos de calidad de vía que se pueden asemejar a las condiciones de un tramo de vía real. La norma presenta unos datos como guía para el estudio de la calidad de vía. Estos datos se han tomado como referencia para definir la irregularidad de la vía en este proyecto.

Tabla 6.1 - Valores medio a pico de defectos aislados AL & IL [20]

Tabla B.3 – Nivel longitudinal – AL & IL – Defectos aislados – Valor medio a pico

Velocidad (en km/h)	Valor medio a pico (en mm) <i>AL</i>		Valor medio a pico (en mm) <i>IL</i>		Valor medio a pico (en mm) <i>IAL</i> (recordatorio)	
	Rango de longitud onda		Rango de longitud onda		Rango de longitud onda	
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>
$V \leq 80$	12 a 18	N/A	17 a 21	N/A	28	N/A
$80 < V \leq 120$	10 a 16	N/A	13 a 19	N/A	26	N/A
$120 < V \leq 160$	8 a 15	N/A	10 a 17	N/A	23	N/A
$160 < V \leq 230$	7 a 12	14 a 20	9 a 14	18 a 23	20	33
$230 < V \leq 300$	6 a 10	12 a 18	8 a 12	16 a 20	16	28

Siguiendo la tabla, para una velocidad de 60 km/h, estableciendo el límite de alerta un rango de longitud de onda D1 (entre 3 y 25 m de longitud de onda) el valor de pico correspondiente está entre 12 y 18 mm. Para aproximarse a unas condiciones reales de irregularidad en vía, se han tomado unos valores para la amplitud del defecto, cercanos pero inferiores a los marcados por el límite de alerta citado. Estos valores elegidos se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 - Amplitud y longitud de onda para las irregularidades

	Amplitud* [mm]	Longitud de onda [m]
Raíl izquierdo	0.009	20.14
Raíl derecho	0.01	20

*Valor pico

La representación gráfica de ambos perfiles se muestra en las figuras 6.7 y 6.8.

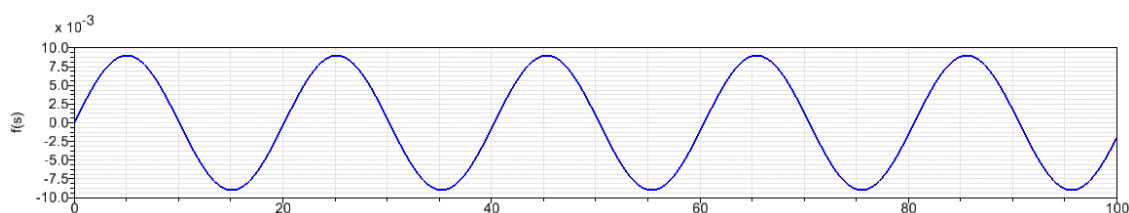


Figura 6.7 - Irregularidad perfil izquierdo

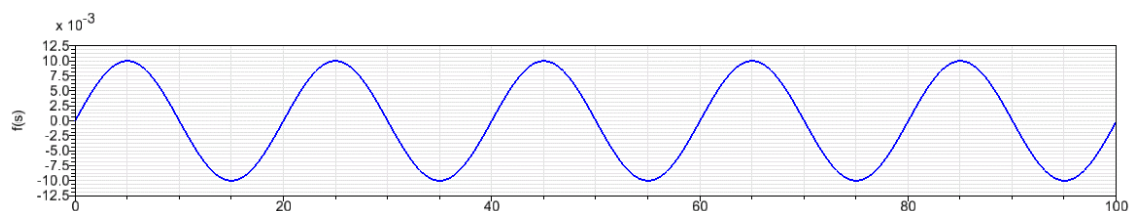


Figura 6.8 - Irregularidad perfil derecho

La vía se ha diseñado en dos tramos rectos. El primero de ellos es de 100 m de longitud y no presenta irregularidades. El segundo es de 400 m de longitud y presenta las irregularidades de las figuras 6.7 y 6.8.

6.3. Modelo en Simulink del controlador borroso

El segundo software que se utiliza en este proyecto es Simulink. Simulink permite realizar el proceso de control, a partir de los datos que llegan desde el modelo en SIMPACK. El modelo es el que se refleja en la figura 6.9.

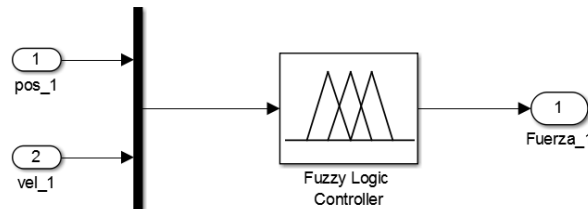


Figura 6.9 - Diagrama de bloques en Simulink de un controlador borroso

En la figura 6.9 aparecen 2 entradas, que en este caso se corresponden con la posición y la velocidad del extremo superior del actuador incluido para la suspensión activa. Esa información de las entradas pasa por el bloque *Fuzzy Logic Controller*, o el Controlador de Lógica Borrosa que proporciona una señal de salida, en este caso la fuerza en el actuador.

El modelo es lo más sencillo posible, pues las señales de entrada llegan directamente desde SIMPACK sin necesidad de ser tratadas en Simulink. Esto se ha hecho de esta manera con el fin de evitar problemas en la interacción de Simulink y SIMPACK. Como primera prueba se tomaba una señal de SIMPACK en Simulink, la aceleración por ejemplo, y se integraba en Simulink para obtener la velocidad. El mismo proceso se realizaba para obtener la posición. Al ejecutar la simulación la respuesta que generaba el controlador no era satisfactoria. Se ha podido concluir que el problema reside en el tiempo de integración, dado que SIMPACK trabaja con valores discretos, resulta fundamental que las condiciones de integración en SIMPACK y Simulink sean idénticas para que no haya problemas de compatibilidad. El uso de bloques derivadores o integradores genera por este motivo, problemas. Consecuentemente, se ha optado por tratar las señales en SIMPACK. En conclusión, se ha integrado la aceleración para obtener tanto la velocidad como la posición, para después enviar directamente esa información al controlador borroso de Simulink.

A lo largo del proyecto se han utilizado distintos controladores, con distinto número y tipo de variables de entrada. Por otro lado, el contenido del elemento *Fuzzy logic controller* se detalla en el capítulo 8 de Simulaciones, pues también se ha ido modificando para intentar conseguir los mejores resultados.

Es importante destacar que no sólo el modelo del vehículo en SIMPACK presenta simplificaciones, también el modelo de controlador es una simplificación de la realidad. Esto es debido a que no se tienen en cuenta aspectos como el retraso en la actuación de la fuerza en los actuadores tras el cálculo de la misma en la unidad de control, así como el modelo inverso que transforma el valor de la fuerza en una señal eléctrica. Por consiguiente, los resultados obtenidos en el presente proyecto deben analizarse teniendo en cuenta estos aspectos.

7. Proceso de cálculo y análisis

7.1. Toma de medidas

Las medidas tomadas en SIMPACK se obtienen de 4 posiciones. Se ha utilizado un elemento “Expression” que permite obtener la aceleración relativa (sin considerar la gravedad) en un punto determinado. Estos elementos están situados en los puntos marcados en color rojo que muestra la figura 7.1, correspondientes a los extremos superiores de los actuadores. Este tipo de elementos actúan de manera similar a un acelerómetro.

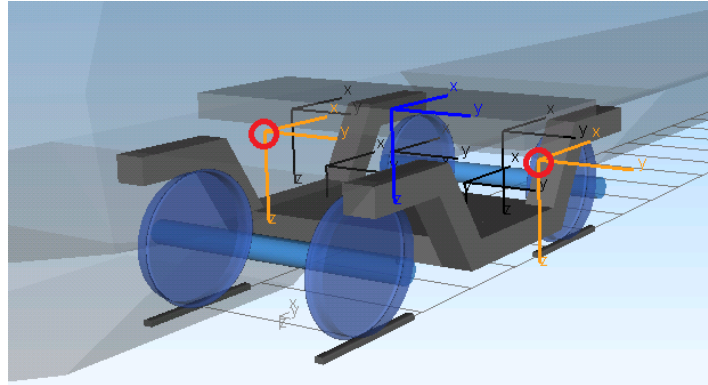


Figura 7.1 - Puntos de medida

La señal de aceleración obtenida se integra una vez en el tiempo para obtener la velocidad y otra vez, para obtener la posición relativa al punto de reposo o equilibrio. La integración se realiza en SIMPACK mediante un elemento tipo “Control element 174: Integrator” que muestra tanto la señal de entrada como la de salida en el post-procesador.

Tal vez, lo más intuitivo para llevar a cabo este proceso, es medir con un sensor (“Kinematic Measurements”: control element 165) que permite obtener posición y velocidad, sin embargo, los resultados obtenidos no eran coherentes. Además, para poder tratar esas señales generadas por el sensor 165, lo que se intentó fue integrar o derivar las señales en Simulink. Esto producía resultados muy poco satisfactorios, como se ha comentado en el apartado 6.3, derivados de los problemas causados por la interacción de ambos programas. Por los malos resultados que se obtenían al tratar las señales procedentes de SIMPACK en Simulink, se ha optado por tratar las señales en SIMPACK directamente. Por tanto, en Simulink sólo se ha llevado a cabo el proceso de inferencia, correspondiente a la lógica borrosa, para obtener la fuerza resultante.

De este proceso se obtienen las señales que son entradas del controlador borroso. Este controlador borroso genera una señal de fuerza para cada actuador. Una vez se ejecuta la simulación, el controlador borroso actúa, calculando la fuerza correspondiente según el valor de las entradas en cada instante. Los resultados de esta simulación constituyen el modo de comparar y evaluar los distintos controladores.

7.2. Evaluación de los controladores. Método

El factor que se utiliza en este proyecto, a la hora de evaluar los resultados obtenidos para cada controlador propuesto, es el confort del viajero. Para cuantificar el confort existen varios métodos:

- Norma UNE-EN 12299: Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los pasajeros.

- Método de Sperling [21].

En el post-procesador de SIMPACK se ofrece la posibilidad de evaluar los resultados mediante el primero de los anteriores citados, así como por las normas:

- ISO 2631: Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero.
- ISO 5349: Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano.
- VDI 2057: Efectos de la vibración mecánica en el hombre

Para este proyecto se ha seleccionado la norma UNE-EN-12299 de 1999. Cabe destacar que existe una versión de Abril de 2010 para esta norma, sin embargo SIMPACK sólo dispone de la versión de 1999. A efectos prácticos, ambas versiones son compatibles para el uso que se le da en este proyecto.

Usar una norma u otra en SIMPACK, de las citadas anteriormente, se reduce a filtrar de una determinada manera la señal de la aceleración de la caja del vehículo. A continuación se desarrolla el modo a través del cual se realiza el filtrado de la aceleración para la norma utilizada en este proyecto.

▪ Norma UNE-EN 12299

La norma UNE-EN 12299 permite medir el índice de comodidad mediante lo que se denomina Comodidad Media. Esta Comodidad Media puede calcularse mediante el Método Normal o el Método Completo. Este último considera dos niveles distintos, uno para viajeros de pie y otro para viajeros sentados. En el presente proyecto se ha considerado el Método Normal, sin embargo en un trabajo futuro, se podría estudiar la posibilidad de analizar mediante el Método Completo, los resultados obtenidos.

La norma establece que para poder medir el índice de comodidad en un vehículo ferroviario de un solo piso, los puntos de medida deben ser a nivel del suelo y con la localización que aparece marcada en la figura 7.2 con una “x”.

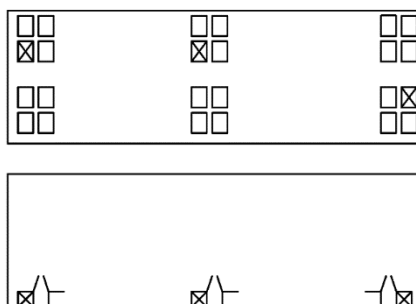


Figura 7.2 - Situación puntos de medida según UNE-EN 12299

Esto se ha seguido para la disposición de los elementos de medida. En este caso se han dispuesto tres acelerómetros (Control element tipo 167), uno en el centro y uno en cada extremo del vehículo y situados a una altura de 1.3 m sobre la vía, representando la disposición descrita.

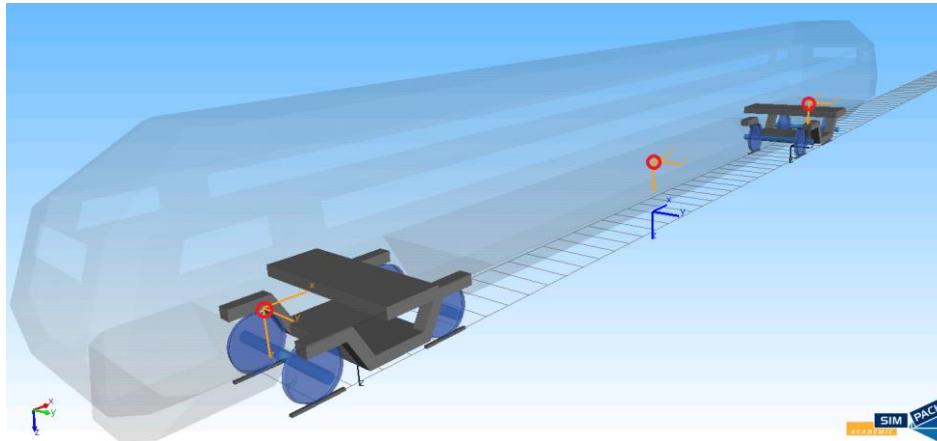


Figura 7.3 - Situación acelerómetros

Estos elementos proporcionan la aceleración (considerando la gravedad) en cada punto, cuya señal se filtra para poder obtener el índice de comodidad para el viajero medio (NMV). La manera de filtrar la aceleración se detalla más adelante.

La norma presenta dos métodos para el cálculo de este NMV. Uno de ellos es el Método Normal que se fundamenta en la expresión (9) y es el utilizado en este caso [22].

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a^{W_d}_{XP95})^2 + (a^{W_d}_{YP95})^2 + (a^{W_b}_{ZP95})^2} \quad (9)$$

donde:

$a^{W_i}_{XJK}$

a: distribución de valores cuadráticos medios de la aceleración en m/s^2 .

W_i : superíndices relacionados con los valores de frecuencia ponderados de acuerdo con la curva de ponderación i:

- i=b, c, d
- b: dirección vertical, W_b
- c: dirección longitudinal (respaldo), W_c
- d: dirección transversal/ longitudinal, W_d

j: subíndices relacionados con la posición de la medición:

- P: interfaz del suelo
- A: interfaz de la base del asiento
- D: interfaz del respaldo del asiento

K: subíndice que indica el percentil usado

($k=95$: para el percentil de orden 95)

Por último, los subíndices X, Y y Z hacen referencia a las aceleraciones longitudinal, transversal y vertical correspondientemente [22].

Por tanto, la expresión calcula el índice de comodidad (NMV) para un punto determinado. Para obtenerlo en SIMPACK se procede de la siguiente manera:

1. Primero, se obtiene la señal de la aceleración en un punto.
2. Se aplica el filtro para obtener los valores ponderados según la norma: (Filtro: “105 Comfort”) con la configuración que corresponda según con la dirección y la curva de ponderación.
3. Se aplica un segundo filtro para obtener el percentil 95 de la distribución.
4. Por último se multiplica el valor obtenido por 6 [23].

En la figura 7.4 se observa el proceso llevado a cabo.

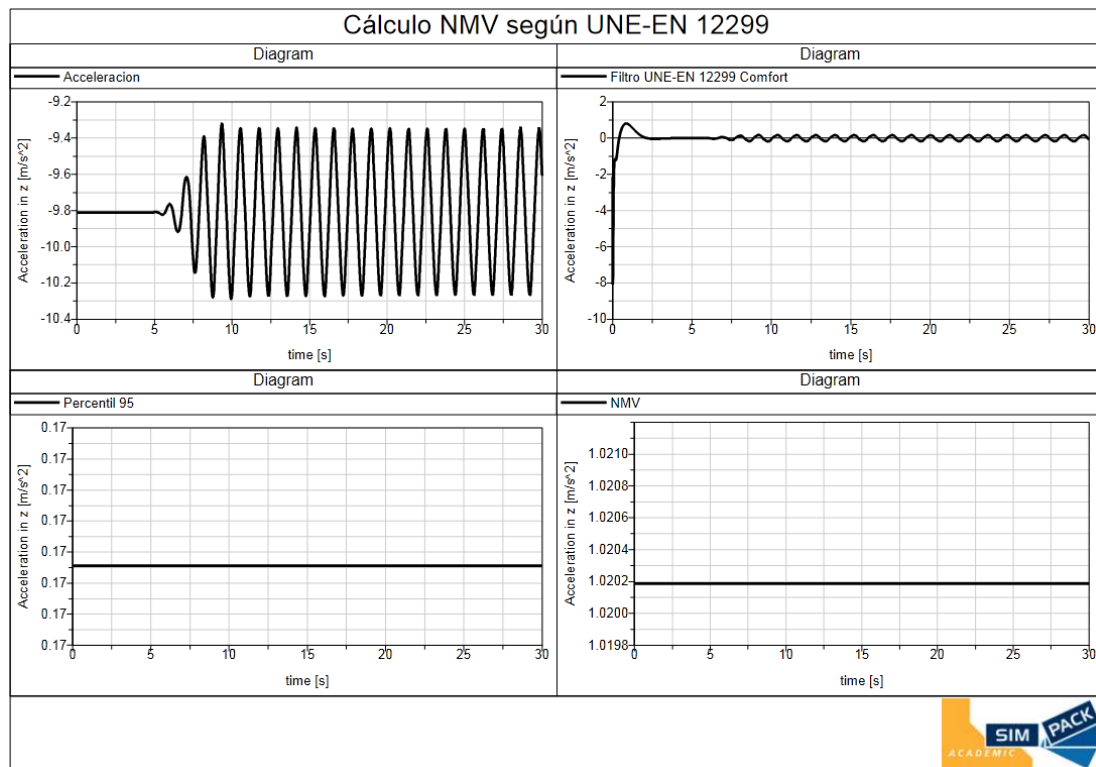


Figura 7.4 - Cálculo NMV desglosado en SIMPACK-Post

Una vez se tienen los índices de comodidad parciales para cada dirección: NMV_x , NMV_y y NMV_z se calcula el índice de comodidad siguiendo la expresión (9).

Por último, falta determinar qué valores para el NMV son aceptables. La norma establece una escala como muestra la tabla 7.1.

Tabla 7.1 – Índices de comodidad para el Viajero [22]

$N_{MV} < 1,5$	Muy cómodo
$1,5 \leq N_{MV} < 2,5$	Cómodo
$2,5 \leq N_{MV} < 3,5$	Medio
$3,5 \leq N_{MV} < 4,5$	Incómodo
$N_{MV} \geq 4,5$	Muy incómodo

7.3. Proceso de cálculo. Resumen

Para aclarar el proceso que se ha seguido en este proyecto a la hora de evaluar cuál es el mejor controlador borroso, se muestra el siguiente esquema de cálculo:

1. Medida de la aceleración en 4 puntos: extremos superiores de los amortiguadores (actuadores para el caso de suspensión activa)
2. Obtención (en SIMPACK) de la velocidad y posición, según corresponda para cada controlador, mediante la integración de la señal de aceleración procedente de los acelerómetros.
3. Esas señales, a saber, posición, velocidad o aceleración, se envían al controlador borroso, diseñado en Simulink.
4. El controlador proporciona una señal de fuerza para cada actuador. Durante la simulación con la suspensión activa operativa (con el controlador de Simulink ejecutándose) se toman medidas para evaluar el confort del viajero.
5. Obtención, mediante acelerómetros, de la aceleración en 3 puntos: uno en el centro y uno en cada extremo del vehículo.
6. La salida de los acelerómetros (aceleración en cada punto) se filtra según la ponderación que establece la norma UNE-EN 12299.
7. Se calcula el percentil 95.
8. Se multiplica por 6: Obtención del NMV_j .
9. Obtención del NMV.
10. Evaluación del NMV según la escala de la tabla 7.1 y por comparación con los otros controladores.

El esquema de la figura 7.5 muestra el proceso llevado a cabo durante una simulación.

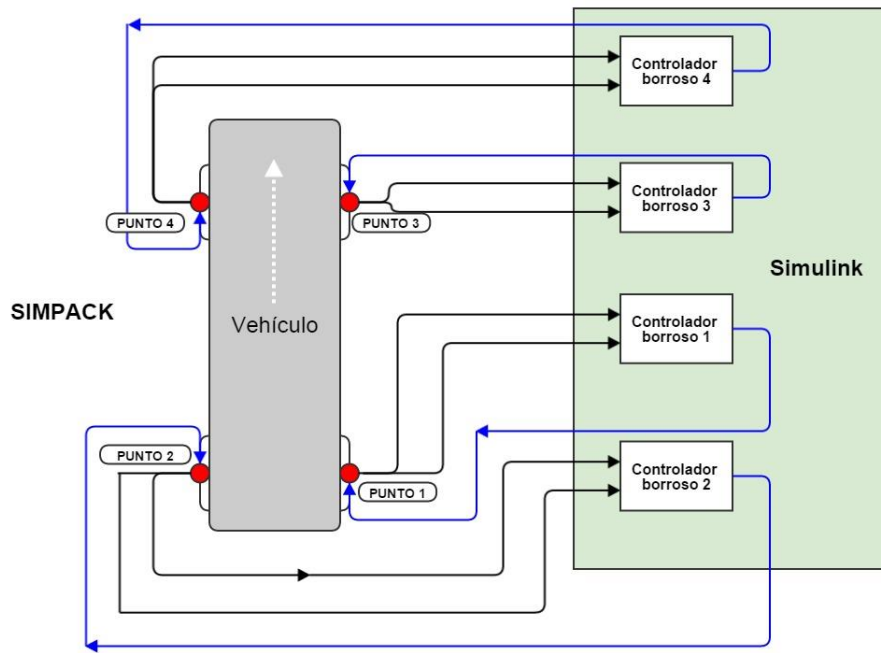


Figura 7.5 - Esquema conexión SIMPACK-Simulink I

En resumen, el proceso de control de la estabilidad consiste en tomar medidas, ya sea aceleración, velocidad o posición en los 4 puntos marcados. Estas medidas se llevan a Simulink, donde son analizadas por el controlador borroso, para después proporcionar una señal de fuerza que se envía de nuevo a SIMPACK, concretamente a los actuadores.

Por otro lado, el esquema de la figura 7.6 muestra el mismo proceso desde el punto de vista de la interacción de los dos software utilizados. Cabe destacar el uso del elemento de control tipo “Matsim (233)” que permite tomar las medidas de los acelerómetros, enviarlas a Simulink para el proceso de inferencia y por último, recibir la señal de la fuerza procedente de Simulink para después enviarla a los actuadores del vehículo.

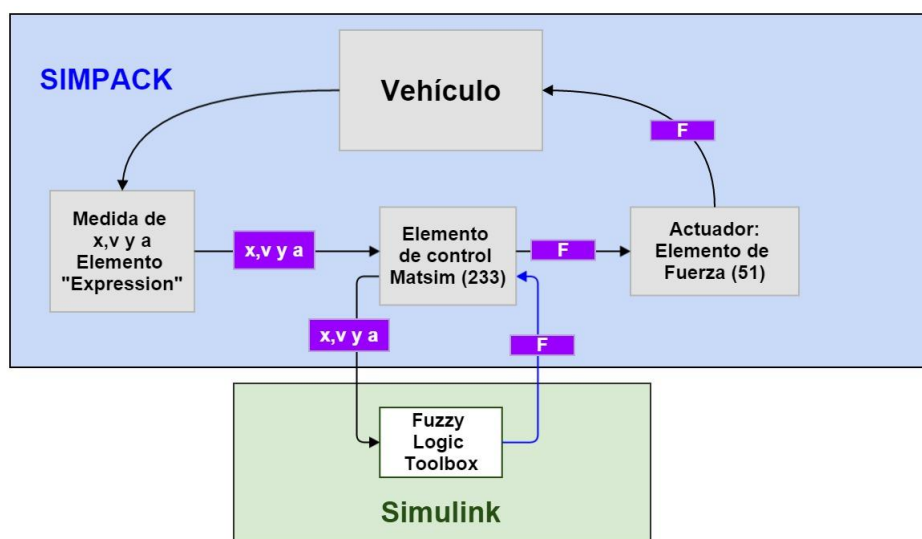


Figura 7.6 - Esquema conexión SIMPACK-Simulink II

8. Simulaciones

8.1. Resultados de las simulaciones

▪ Parámetros de simulación

Para todas las simulaciones se han establecido las siguientes condiciones:

$$V_{vehículo} = 60 \text{ km/h}$$

$$t_{simulación} = 30 \text{ s}$$

La irregularidad de los perfiles de la vía se mantiene invariante en las distintas simulaciones y son las que se explicaron en el apartado 6.2.

Por tanto, lo único que ha variado entre cada simulación es la propia suspensión. Tomando como referencia la suspensión pasiva se han llevado a cabo una serie de simulaciones que tan sólo difieren en el controlador borroso.

La estructura de los resultados es la siguiente. Se presentan los índices de comodidad del viajero para los 3 puntos de medida (punto delantero, central y trasero en el suelo del compartimento de viajeros). Estos índices son los valores a mejorar al implantar la suspensión activa. Después se muestra la fuerza en los 4 amortiguadores correspondientes a la suspensión secundaria. En el caso de las suspensiones activas se muestra la fuerza ejercida por los 4 actuadores que sustituyen a los amortiguadores citados.

Como se explicó en el capítulo 4.2, para el desarrollo de un sistema basado en lógica borrosa es fundamental la experiencia, por ello los modelos aquí presentados se basan en la estructura seguida por anteriores estudios similares [24] y [25]. Especialmente se ha tomado como referencia el número y tipo de variables elegidas en estos estudios y las conclusiones obtenidas en los mismos.

▪ Suspensión pasiva

En primer lugar se ha llevado a cabo una simulación con la suspensión pasiva para después tomarla como referencia e intentar mejorar los resultados en base al confort de los viajeros.

Los índices de comodidad en este caso son los mostrados en la figura 8.1.

Tabla 8.1 - Resultados NMV suspensión pasiva

NMV_{DELANTERO}	1,512739408
NMV_{CENTRO}	1,527402793
NMV_{TRASERO}	1,543804079

Estos resultados se extraen del SIMPACK-Post como muestran las figuras 8.1, 8.2 y 8.3.

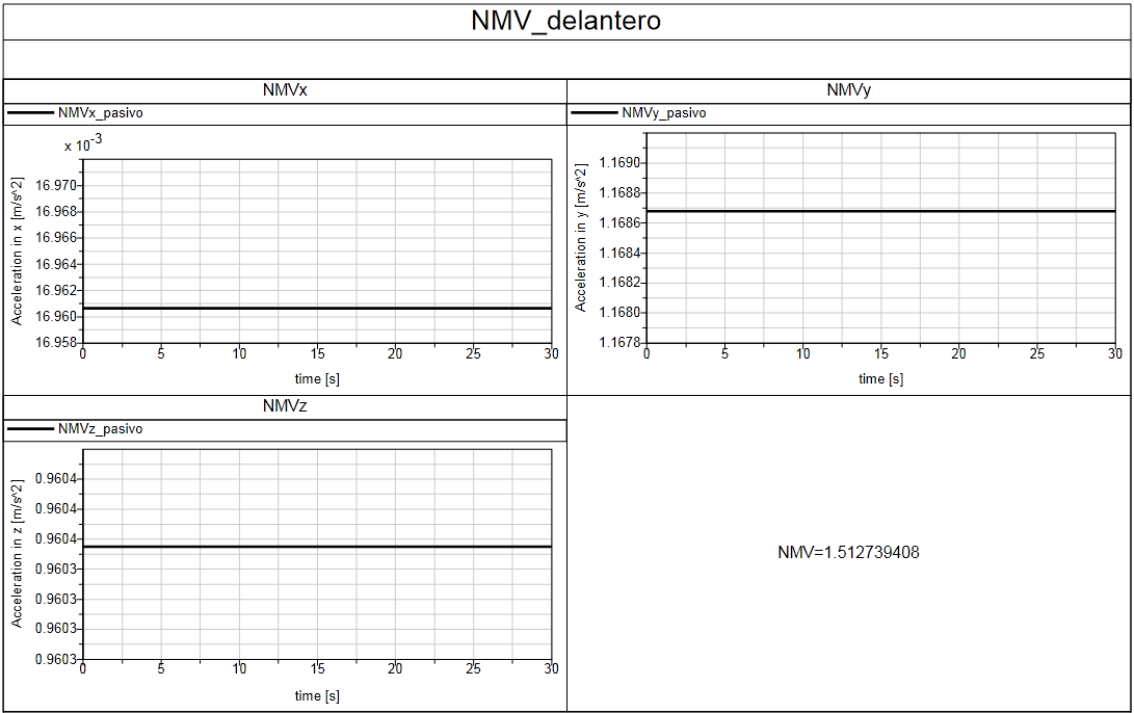


Figura 8.1 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Pasiva

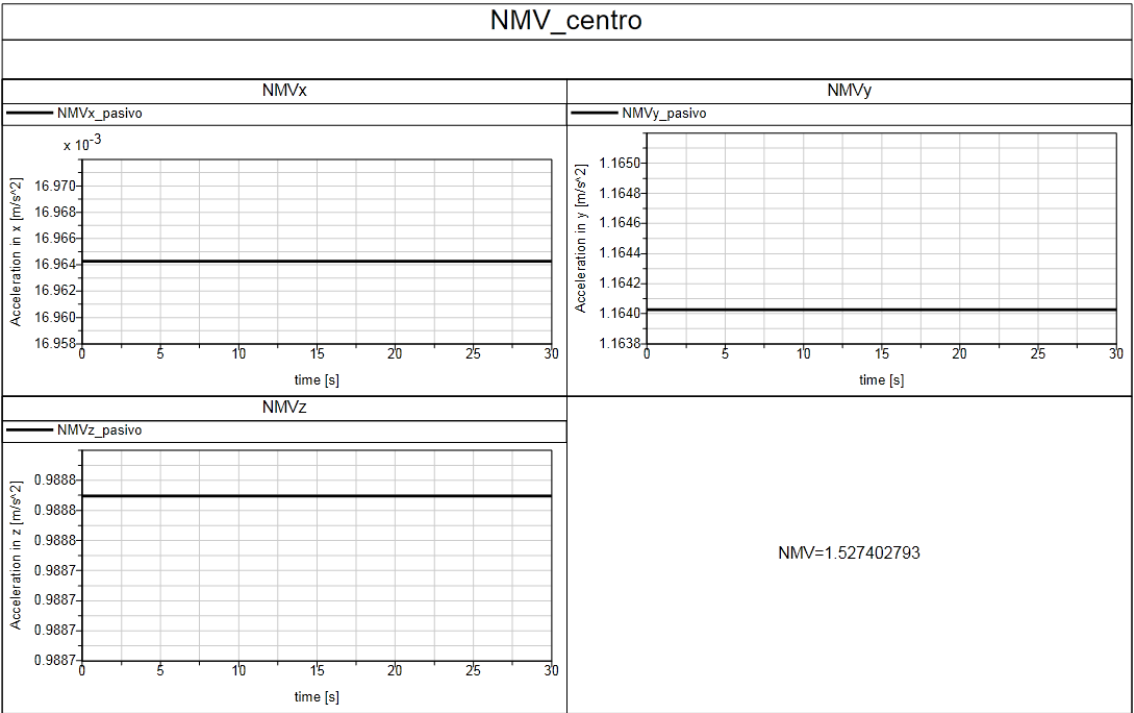


Figura 8.2 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Pasiva

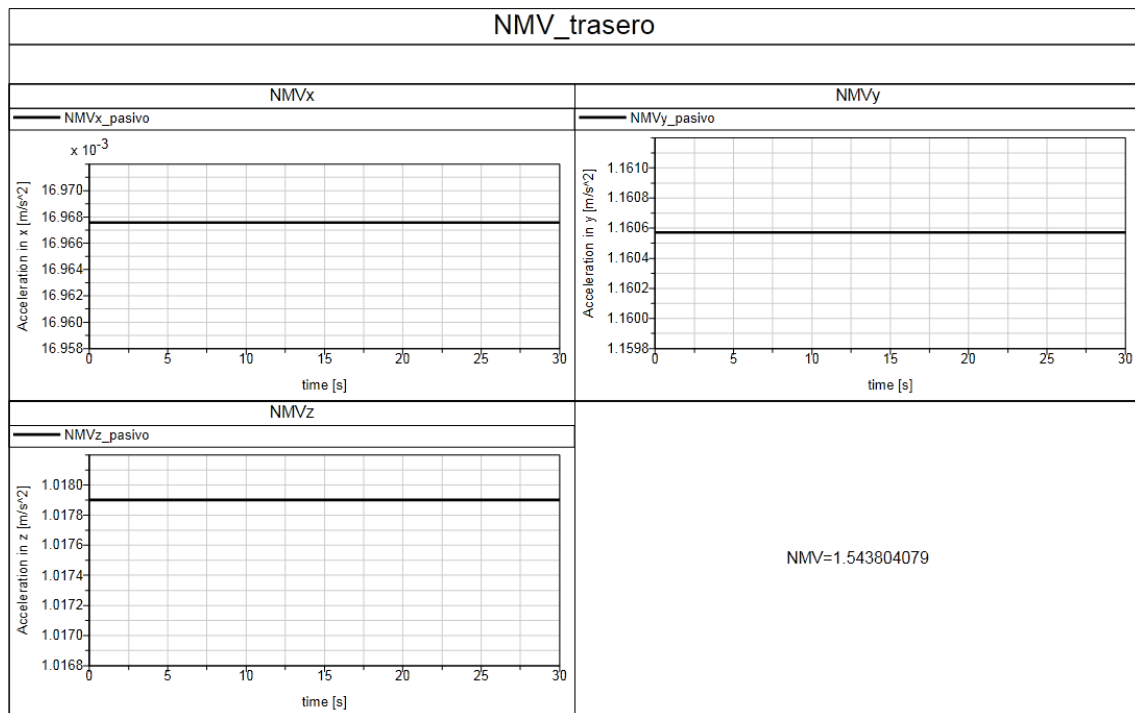


Figura 8.3 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Pasiva

La fuerza en los amortiguadores es la que se muestra en las gráficas de la figura 8.4. Se alcanzan valores dentro de un rango comprendido entre -2000 N y 2000 N.

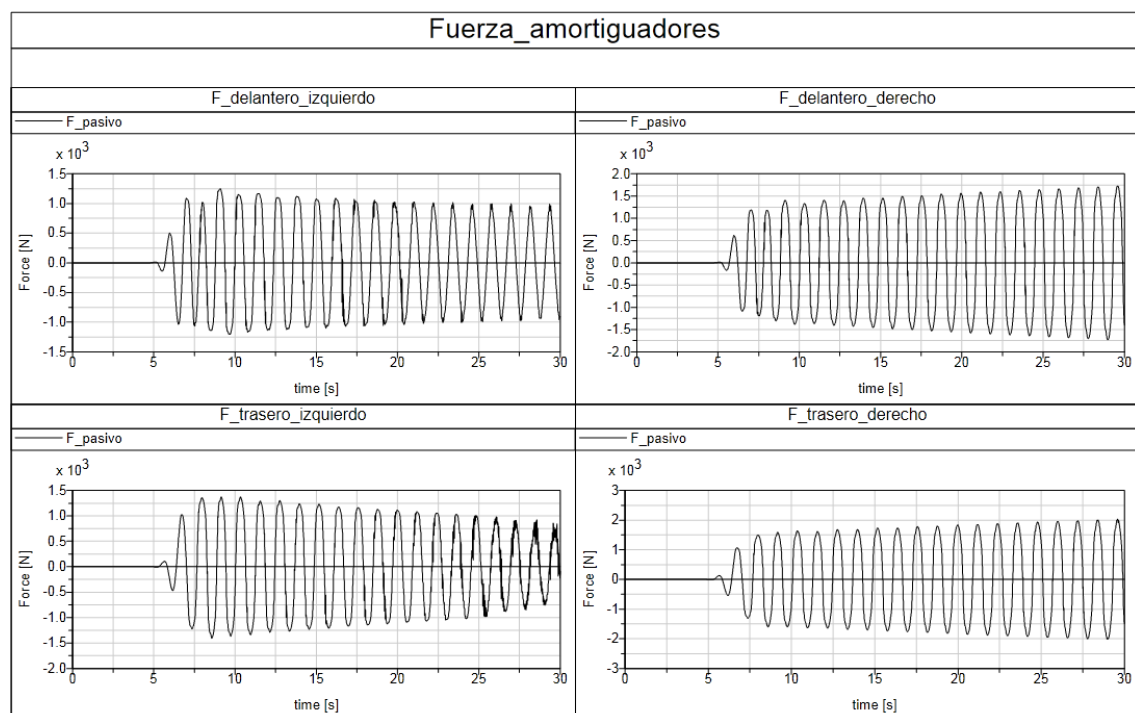


Figura 8.4 - Fuerza en amortiguadores. Susp. Pasiva

Por último, se muestra en las figuras 8.5, 8.6, 8.7 y 8.8 la posición, velocidad y aceleración de los extremos superiores de los amortiguadores de las 4 posiciones. Esta información constituye la información de entrada para el controlador borroso.

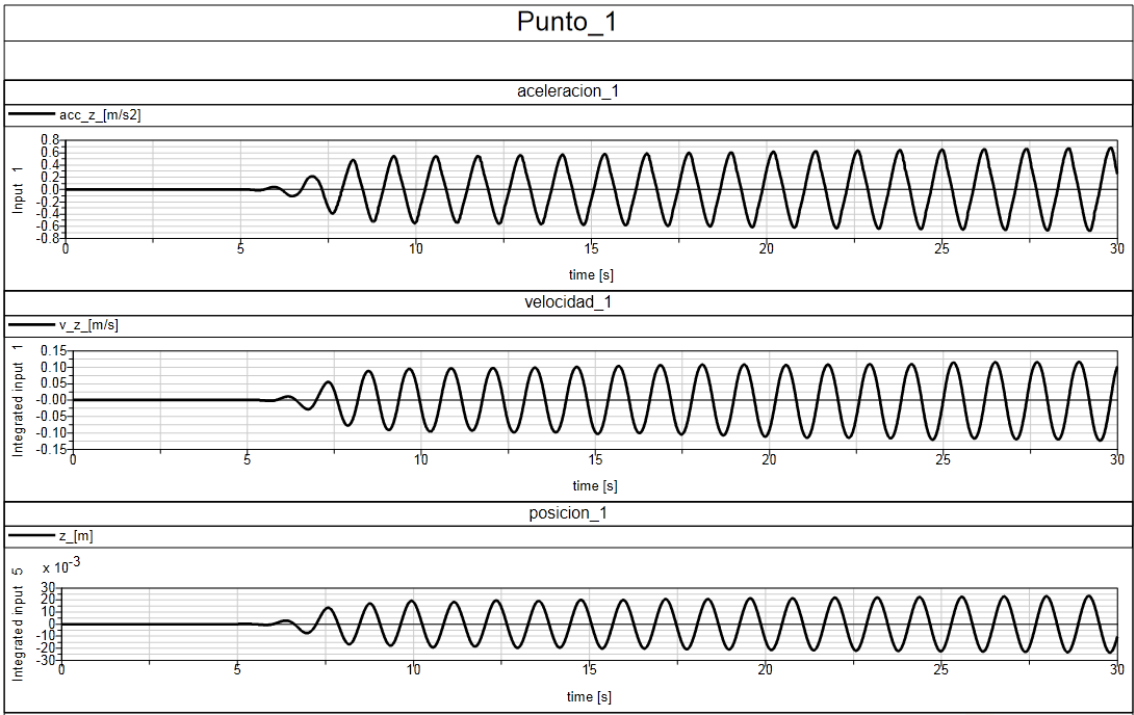


Figura 8.5 - Posición, Velocidad y Aceleración en Punto de medida 1

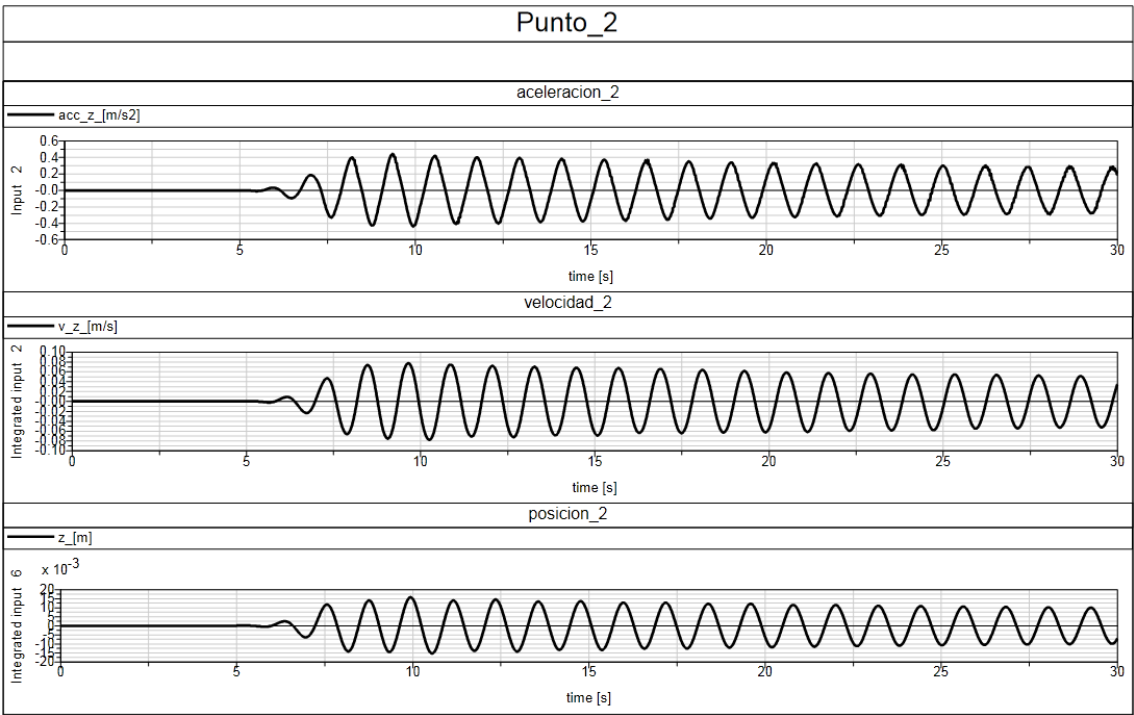


Figura 8.6 - Posición, Velocidad y Aceleración en Punto de medida 2

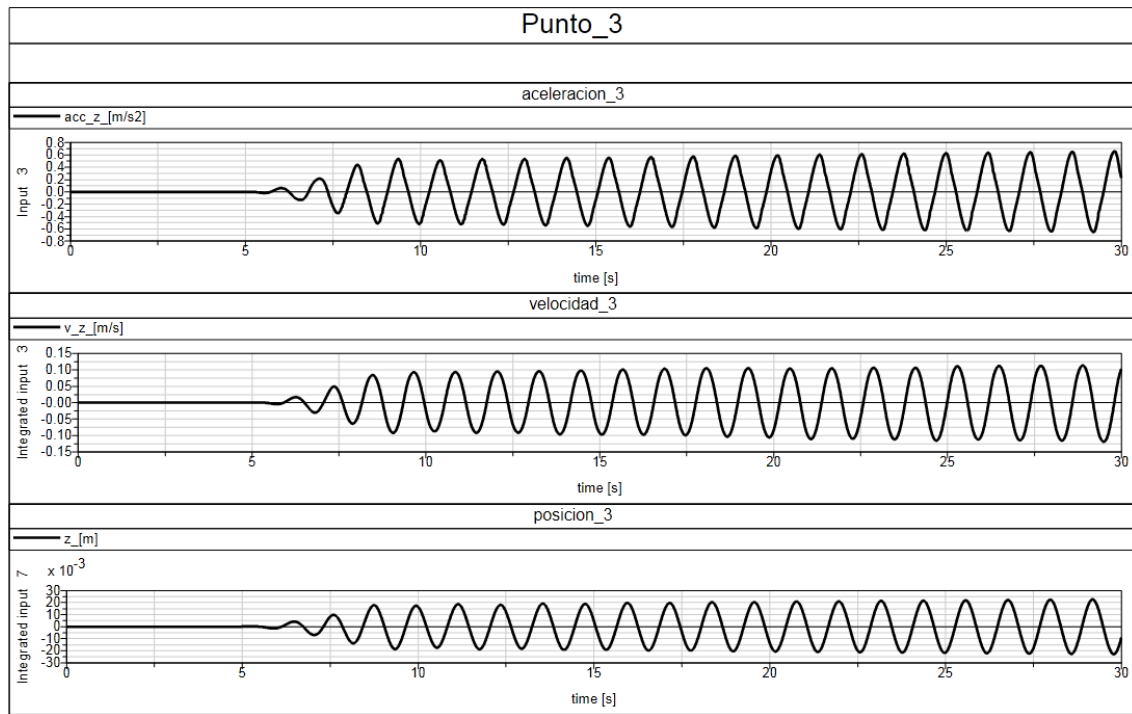


Figura 8.7 - Posición, Velocidad y Aceleración en Punto de medida 3

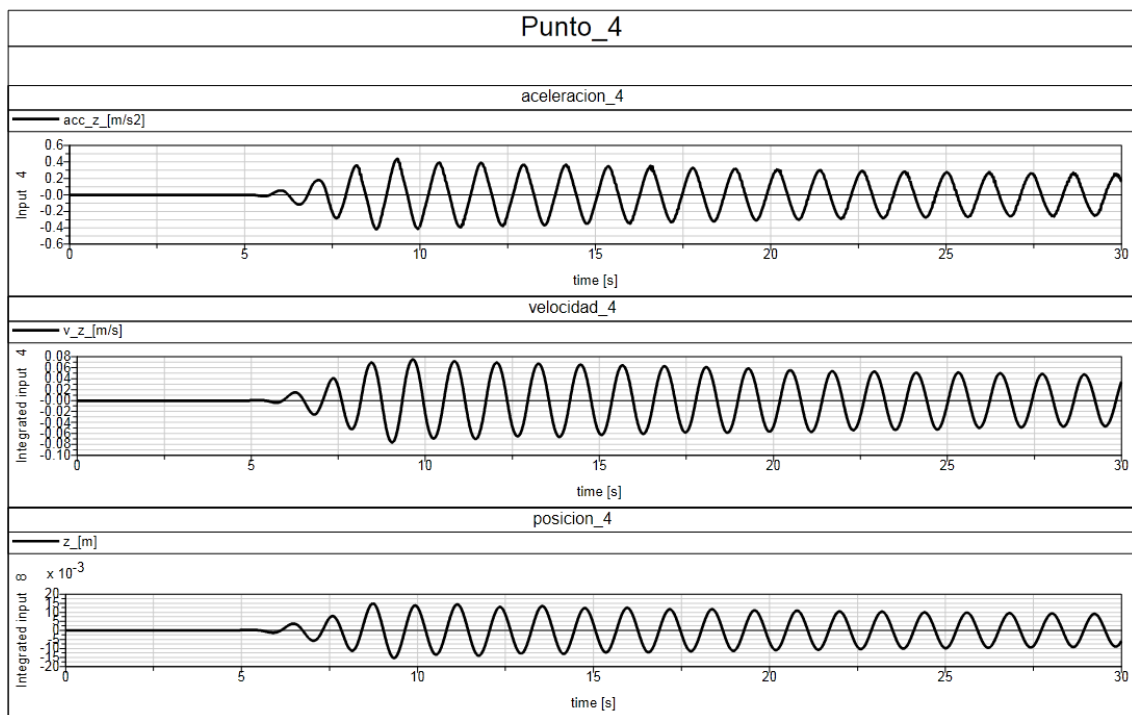


Figura 8.8 - Posición, Velocidad y Aceleración en Punto de medida 4

Los puntos 1, 2, 3 y 4 corresponden a los extremos superiores de los amortiguadores trasero derecho, trasero izquierdo, delantero derecho y delantero izquierdo correspondientemente.

▪ Suspensión activa 1

La suspensión activa 1 es la primera configuración que se propone en este estudio. Se utilizan como variables de entrada la posición y la velocidad de los puntos citados anteriormente. Se han sustituido los amortiguadores, como se ha desarrollado en apartados anteriores, por actuadores.

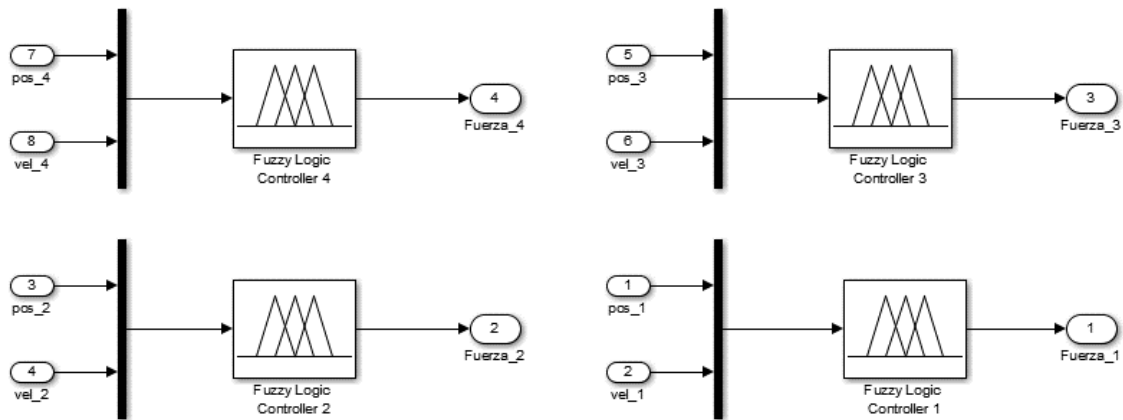


Figura 8.9 - Controlador borroso del vehículo en Simulink

El modelo en Simulink se muestra en la figura 8.9. Se definen 8 entradas, 2 para cada actuador; 4 salidas, correspondientes a cada señal de fuerza dependiendo del actuador; y el bloque correspondiente al controlador borroso, que es el mismo para los 4 actuadores. El controlador 1 corresponde con el actuador trasero derecho, el controlador 2 con el trasero izquierdo, el controlador 3 con el delantero derecho y el controlador 4 con el delantero izquierdo. El controlador borroso en este caso es el que se muestra en la figura 8.10.

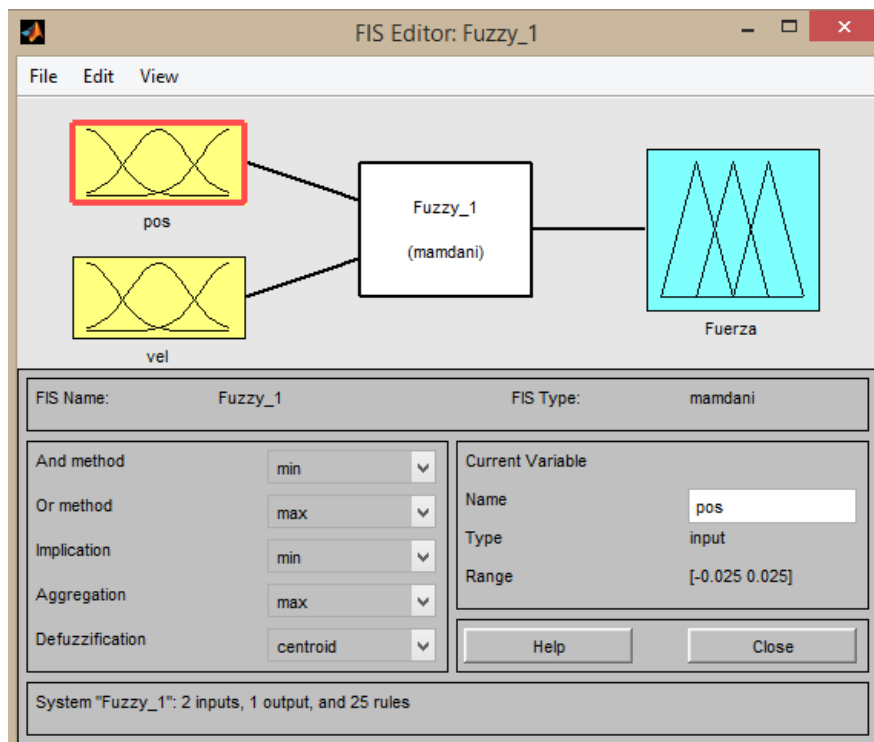


Figura 8.10 - Controlador para la suspensión activa 1

Los rangos para las variables del controlador borroso (posición, velocidad y fuerza) se han tomado según los resultados de la suspensión pasiva. Para la posición se ha definido un rango entre -0.025 y 0.025 m, para la velocidad un rango entre -0.13 y 0.13 m/s y para la fuerza un rango entre -2000 y 2000 N.

Los conjuntos borrosos del controlador son, para la posición y la velocidad, los representados en la figura 8.11 y 8.12 correspondientemente. Para los conjuntos de los extremos se han utilizado gráficas tipo trapezoidal (trapezf) para asegurar que cualquier valor que se pueda dar durante la simulación esté dentro del rango elegido. Para el resto de conjuntos se han utilizado gráficas tipo triangulares (trimf).

Por tanto,

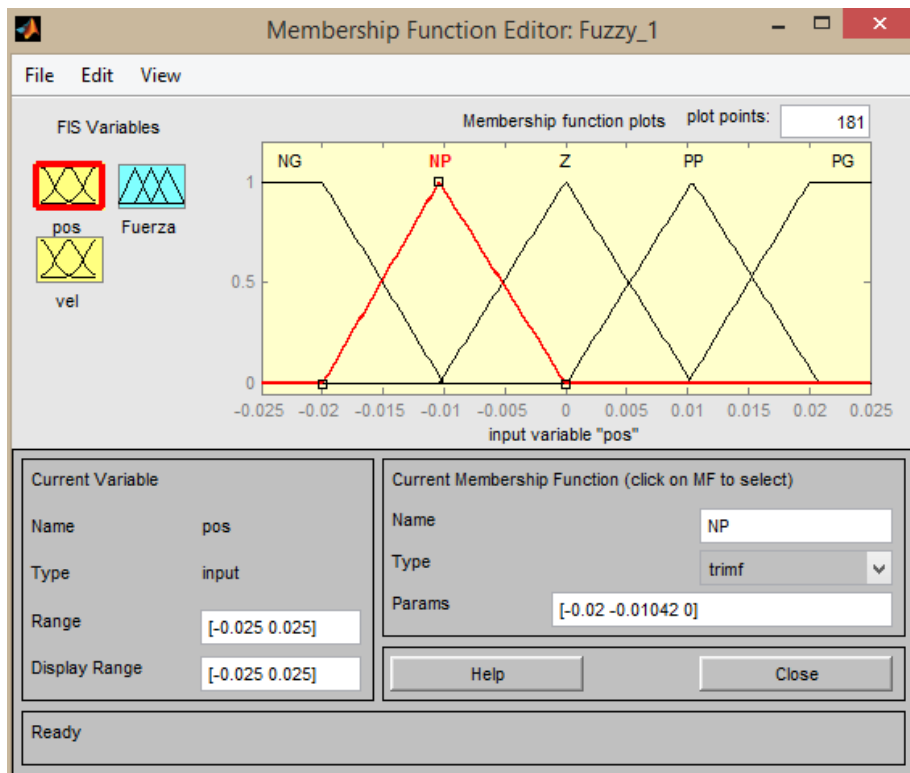


Figura 8.11 - Conjuntos borrosos para la variable "Posición"

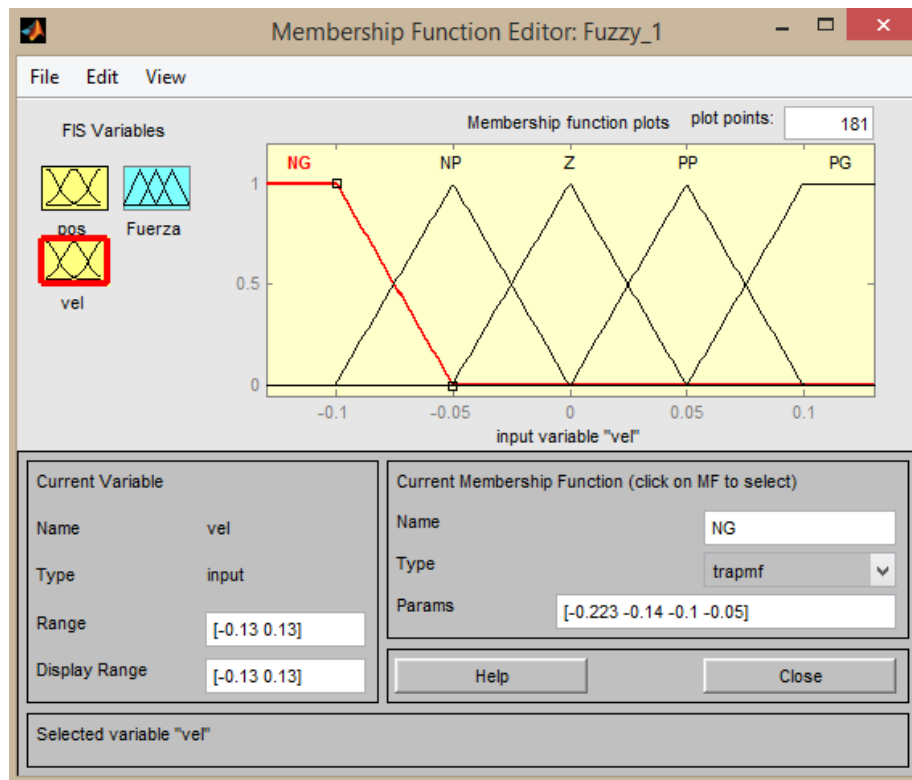


Figura 8.12 - Conjuntos borrosos para la variable "Velocidad"

Y para la fuerza, los conjuntos borrosos son los que se muestran en la figura 8.13.

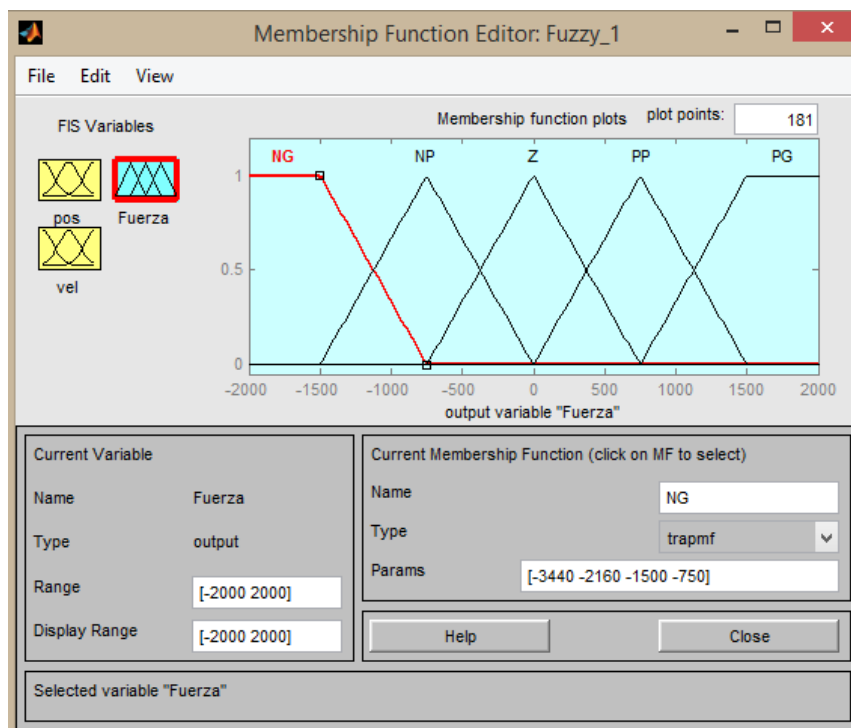


Figura 8.13 - Conjuntos borrosos para la variable "Fuerza"

Para las 3 variables se han elegido 5 conjuntos distribuidos de manera simétrica a lo largo del rango de valores posibles (ver tabla 8.2).

Tabla 8.2 - Conjuntos borrosos definidos

NG	Negativo Grande
NP	Negativo Pequeño
Z	Cero (Zero)
PP	Positivo Pequeño
PG	Positivo Grande

El método de cálculo del controlador elegido ha sido “Mandami” como se comentó en el capítulo 4.

Por último, en la tabla 8.3 se muestra el listado de las reglas utilizadas. Dado que se tienen 2 variables de entrada, 1 variable de salida y 5 conjuntos borrosos para cada variable; se formulan un total de 25 reglas, con el fin de representar cualquier caso que se pueda dar durante la simulación.

Tabla 8.3 - Conjunto de reglas Susp.Activa 1

Regla	Pos (posición)	Vel (velocidad)	Fuerza
1	NG	NG	PG
2	NG	NP	PG
3	NG	Z	PP
4	NG	PP	PP
5	NG	PG	PP
6	NP	NG	PG
7	NP	NP	PG
8	NP	Z	PP
9	NP	PP	Z
10	NP	PG	NP
11	Z	NG	PP
12	Z	NP	PP
13	Z	Z	Z
14	Z	PP	NP
15	Z	PG	NP
16	PP	NG	PP
17	PP	NP	PP
18	PP	Z	NP
19	PP	PP	NG
20	PP	PG	NG
21	PG	NG	PP
22	PG	NP	PP
23	PG	Z	PP
24	PG	PP	NP
25	PG	PG	NG

Una vez definidos todos estos parámetros se lleva a cabo la simulación y los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación. Cabe destacar que los resultados de las diferentes simulaciones se comparan con los obtenidos con la suspensión pasiva. Como indica

la leyenda de las figuras 8.14 y 8.15, en rojo aparece representada la señal de la fuerza en el caso de la suspensión activa, mientras que en negro se representa la señal correspondiente a la suspensión pasiva.

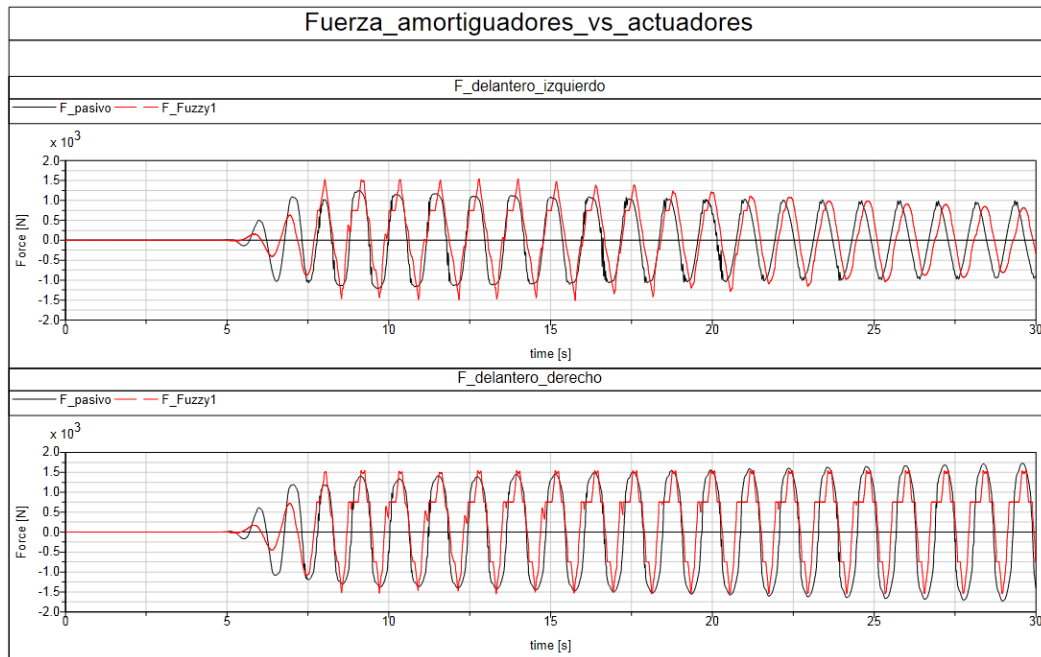


Figura 8.14 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 1

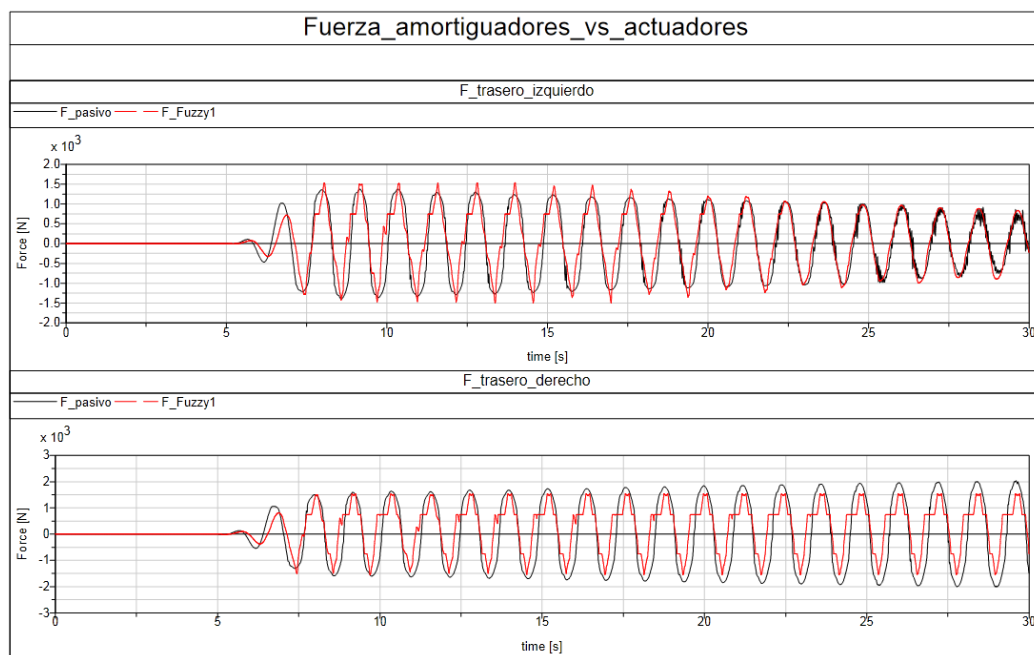


Figura 8.15 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 1

Como se puede observar en las figuras 8.14 y 8.15 la fuerza ejercida por los actuadores es muy similar a la de los amortiguadores en la suspensión pasiva.

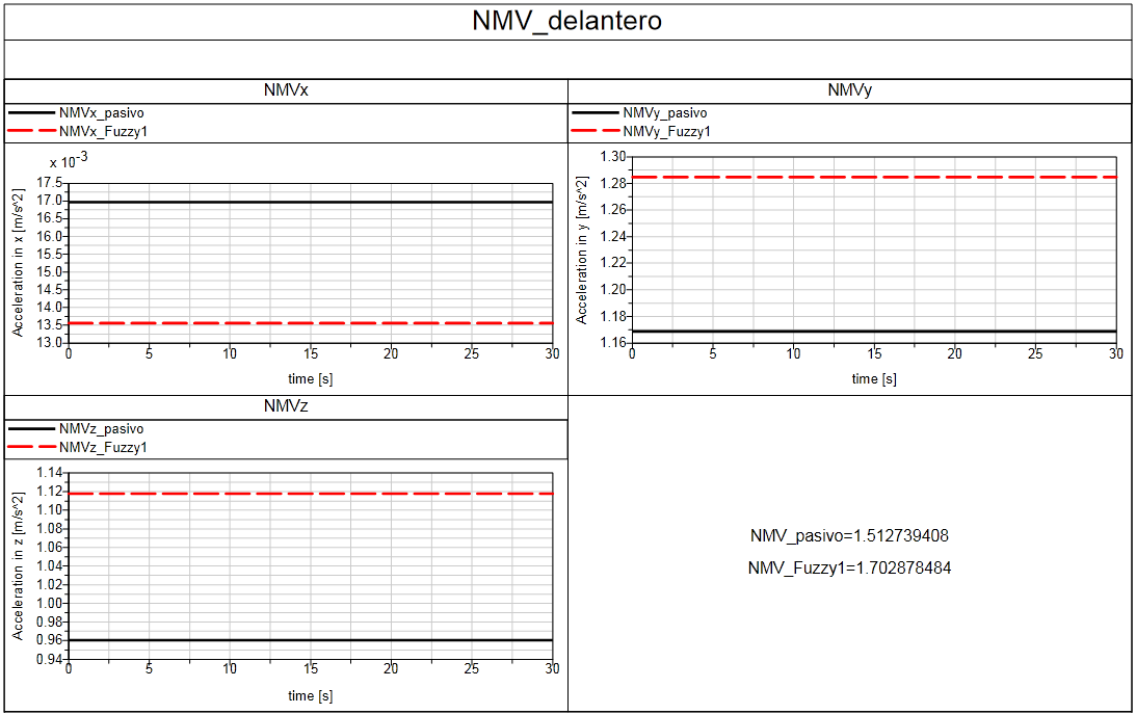


Figura 8.16 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 1

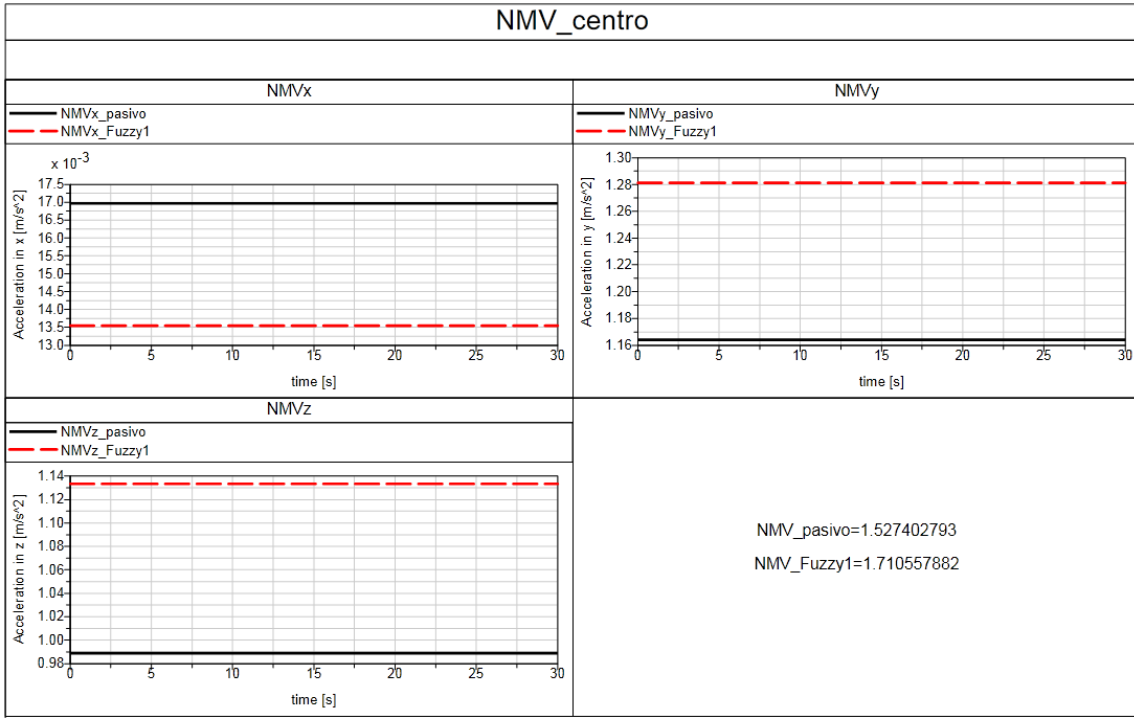


Figura 8.17 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 1

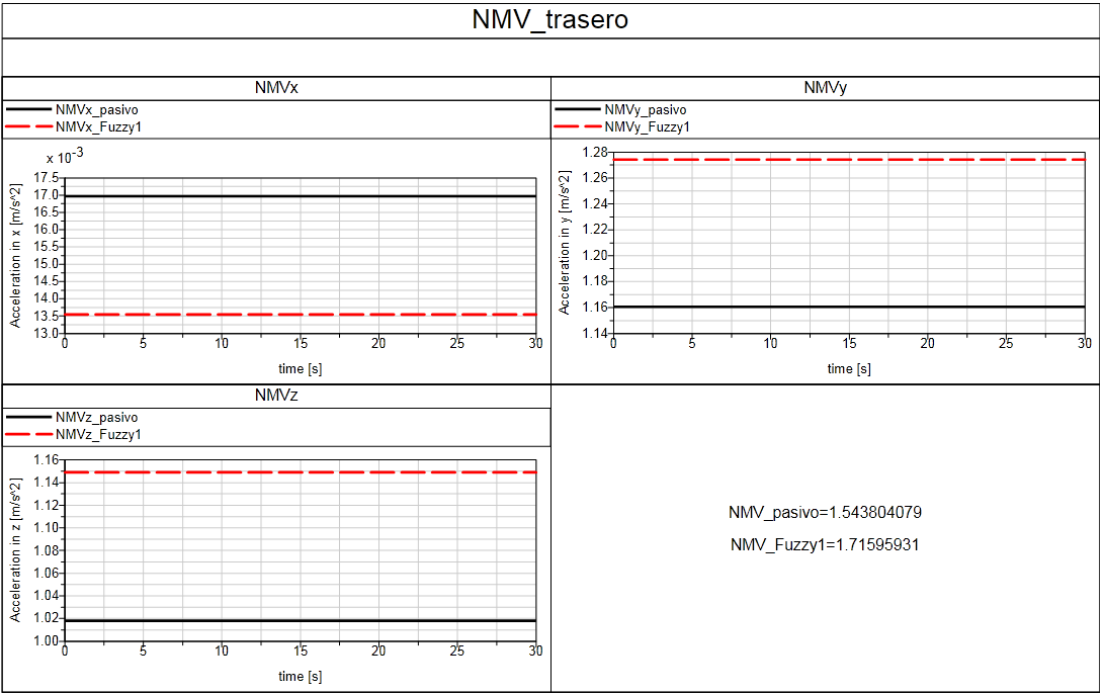


Figura 8.18 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 1

Atendiendo a los resultados, los índices de comodidad han empeorado respecto a la suspensión pasiva en torno a un 12%, como muestra la tabla 8.4.

Tabla 8.4 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 1 vs Susp.Pasiva

	NMV_Pasivo	NMV_Fuzzy_1	%
NMV _{DELANTERO}	1,512739408	1,702878484	-12,57%
NMV _{CENTRO}	1,527402793	1,710557882	-11,99%
NMV _{TRASERO}	1,543804079	1,71595931	-11,15%

▪ Suspensión activa 2

Para intentar obtener mejores resultados se ha modificado el rango de valores posibles para la fuerza en los actuadores. Se ha aumentado a ± 2500 N.

La fuerza ejercida por los actuadores en este caso es la que se muestra en las figuras 8.19 y 8.20.

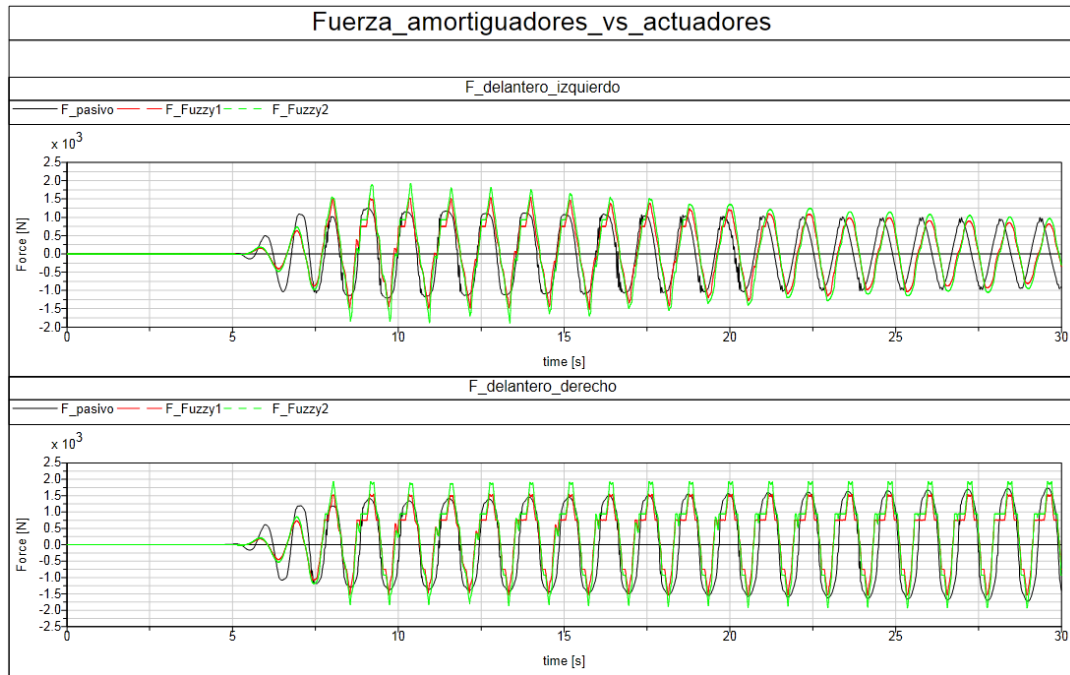


Figura 8.19 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 2

Al haber aumentado el rango de actuación de los actuadores, la fuerza ejercida por los mismos alcanza valores superiores en algunos instantes, como muestra la gráfica verde de la figuras 8.19 y 8.20, concretamente en los máximos y mínimos relativos.

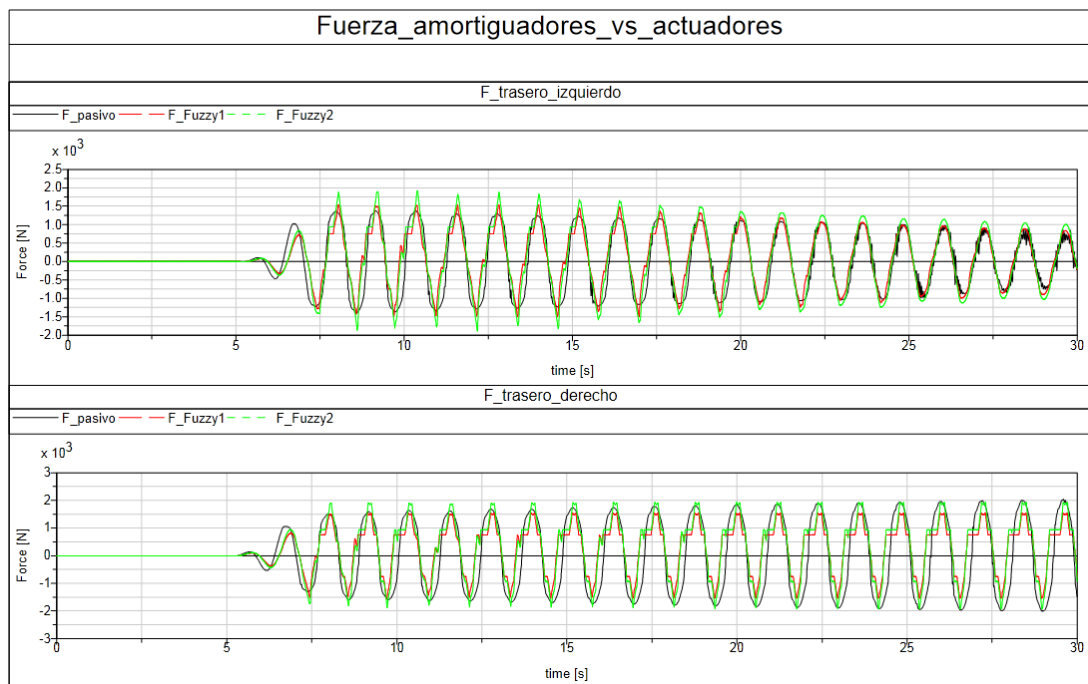


Figura 8.20 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 2

Las figuras 8.21, 8.22 y 8.23 muestran los índices de comodidad para el sistema de suspensión activa 2.

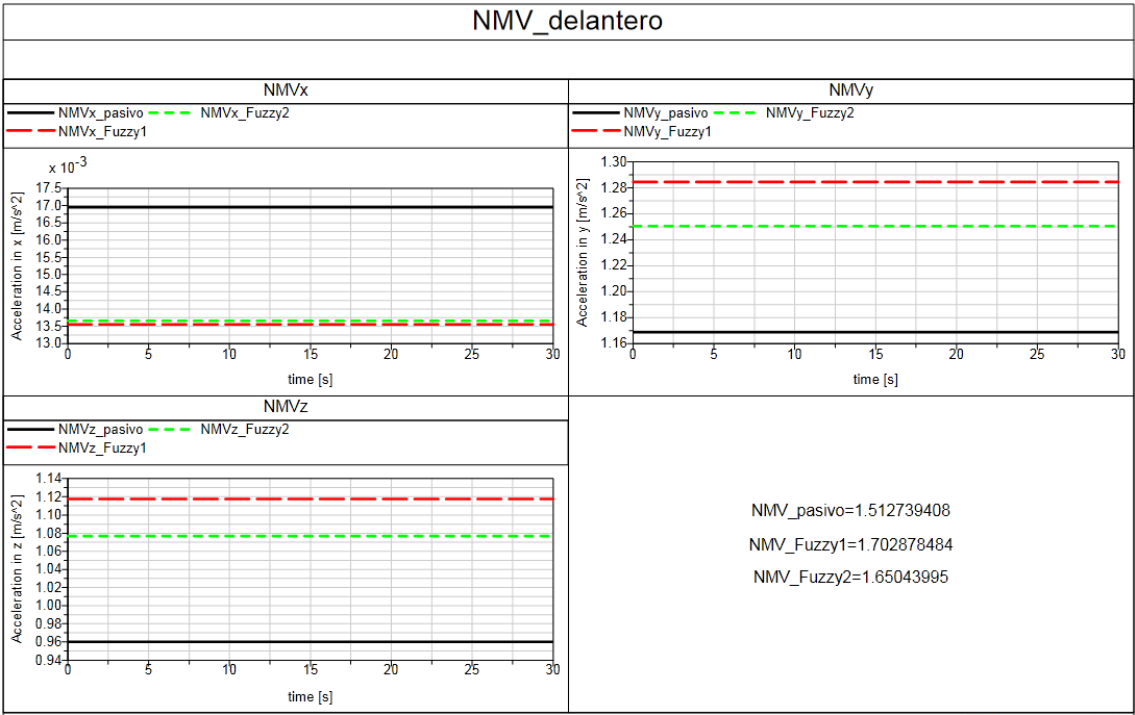


Figura 8.21 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 2

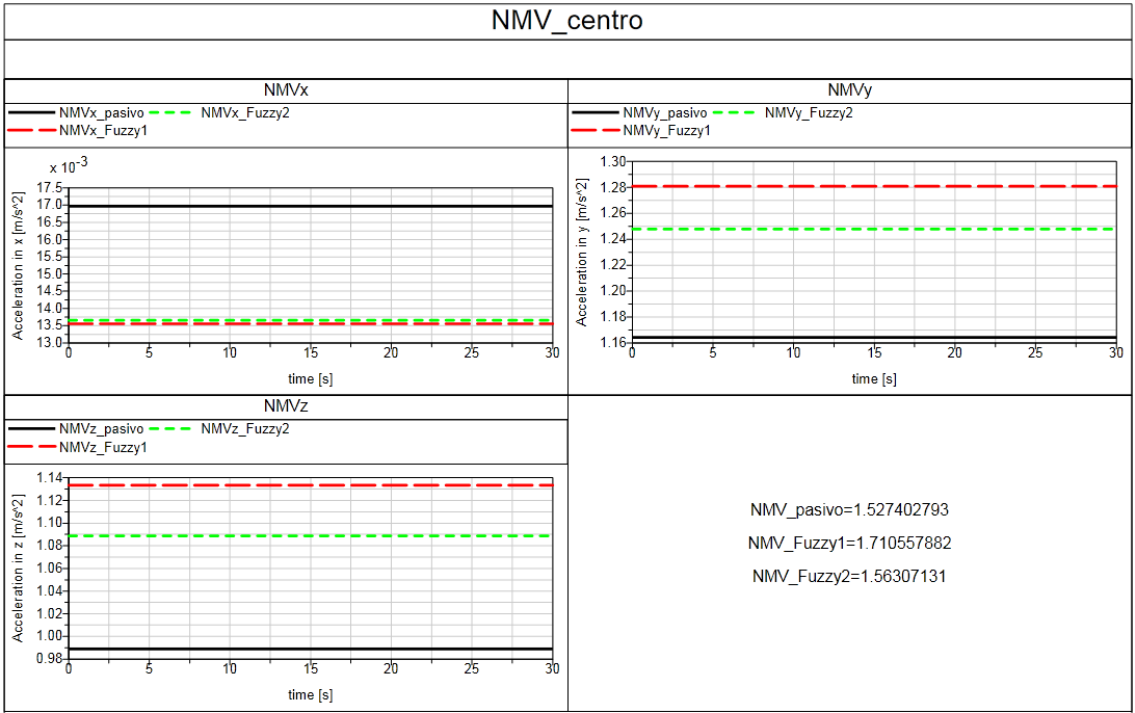


Figura 8.22 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 2

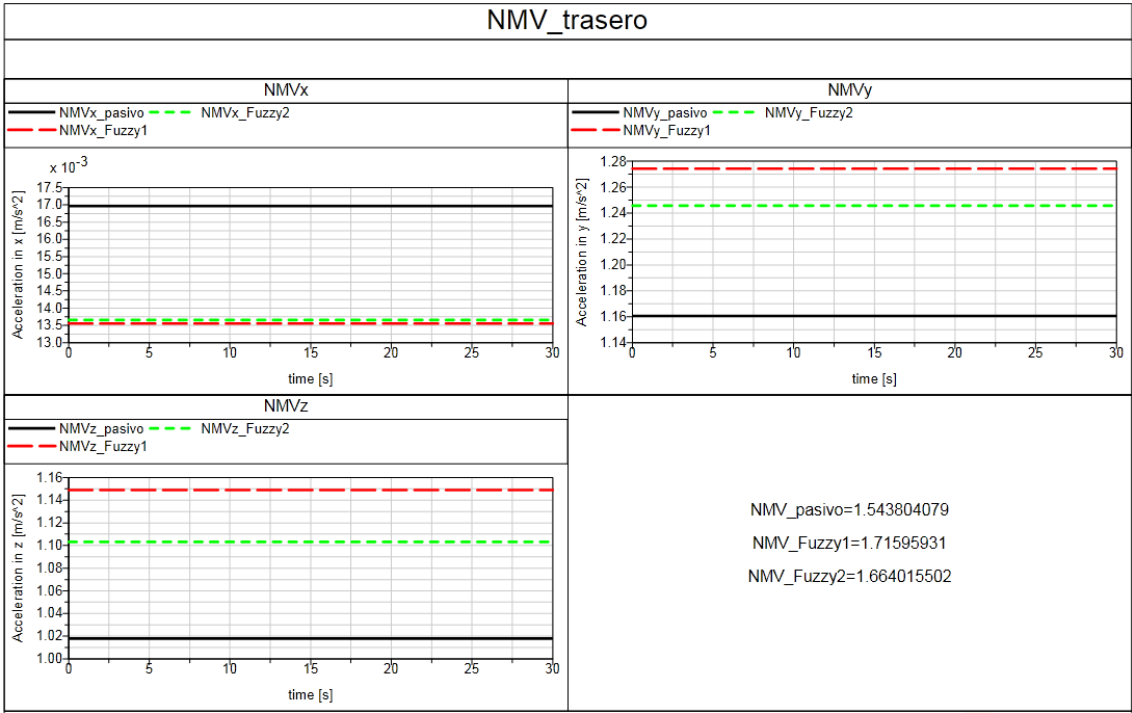


Figura 8.23 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 2

Atendiendo a los resultados, los índices de comodidad siguen siendo peores respecto a la suspensión pasiva (ver tabla 8.5), sin embargo la diferencia es mucho menor puesto que se ha mejorado en relación a la anterior solución propuesta (suspensión activa 1).

Tabla 8.5 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 2 vs Susp.Pasiva

	NMV_Pasivo	NMV_Fuzzy_2	%
NMV _{DELANTERO}	1,512739408	1,65043995	-9,10%
NMV _{CENTRO}	1,527402793	1,56307131	-2,34%
NMV _{TRASERO}	1,543804079	1,664015502	-7,79%

De estos resultados se llega a la conclusión de que incrementando la fuerza en los actuadores se reduce el índice de comodidad, aumentando así el confort del viajero.

■ Suspensión activa 3

A partir de las anteriores conclusiones, se ha aumentado a ± 5000 N para intentar mejorar el índice de comodidad. El resto de parámetros se han mantenido invariables respecto a las suspensiones activas 1 y 2.

La fuerza ejercida por los actuadores en este caso es la que se muestra en las figuras 8.24 y 8.25.

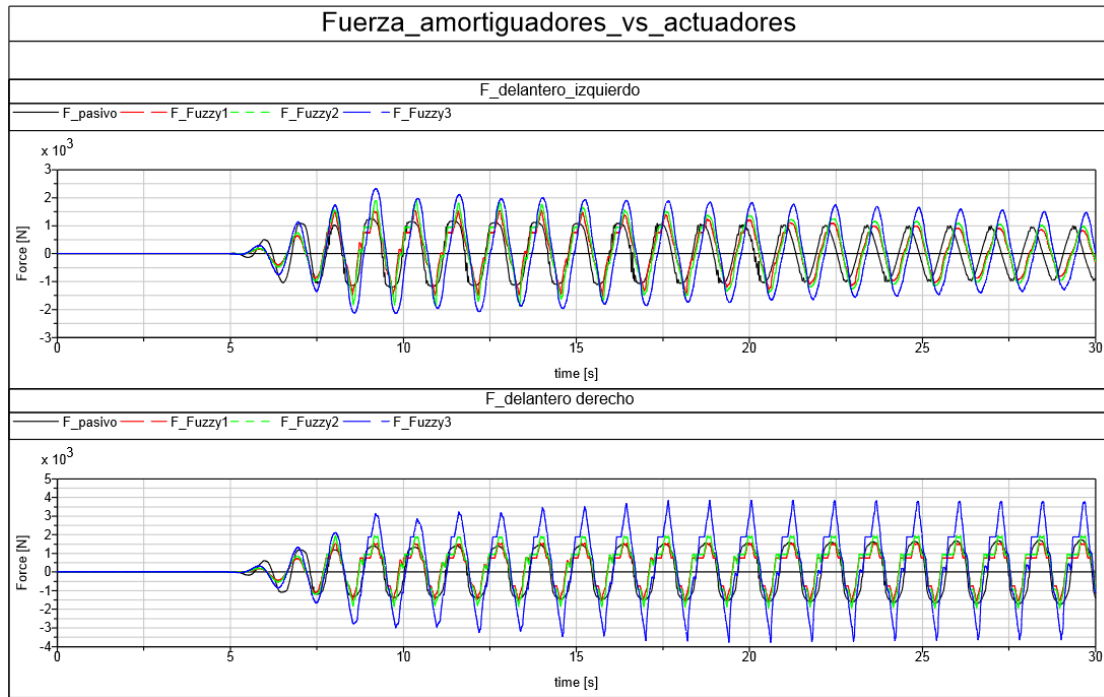


Figura 8.24 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 3

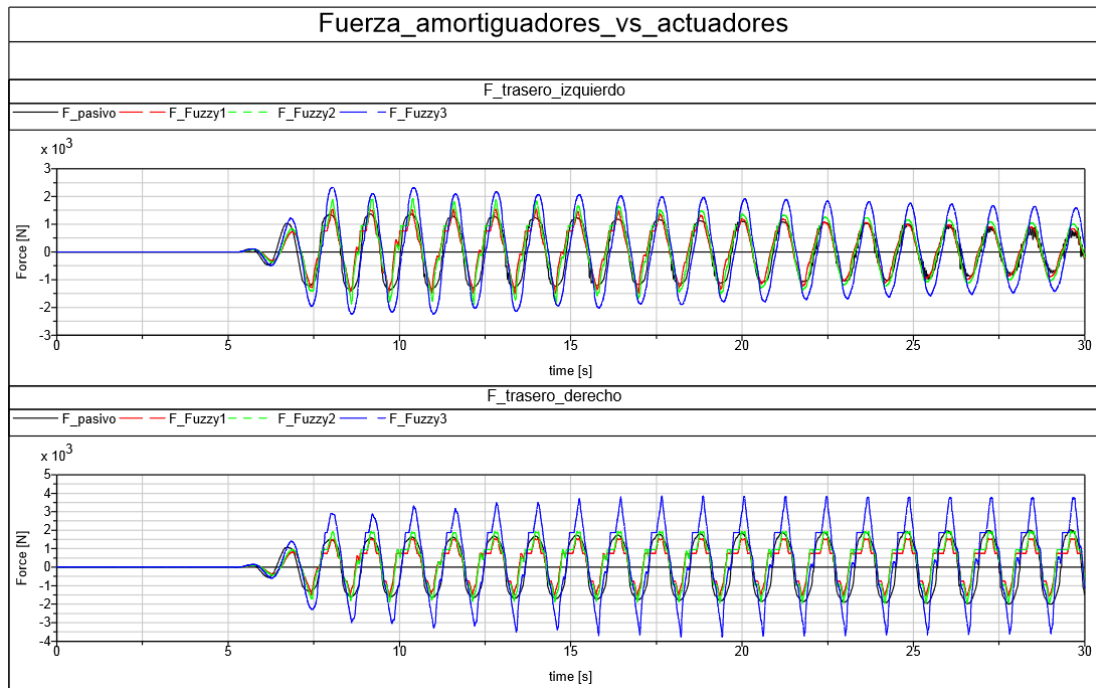


Figura 8.25 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 3

Las figuras 8.26, 8.27 y 8.28 muestran los índices de comodidad para el sistema de suspensión activa 3.

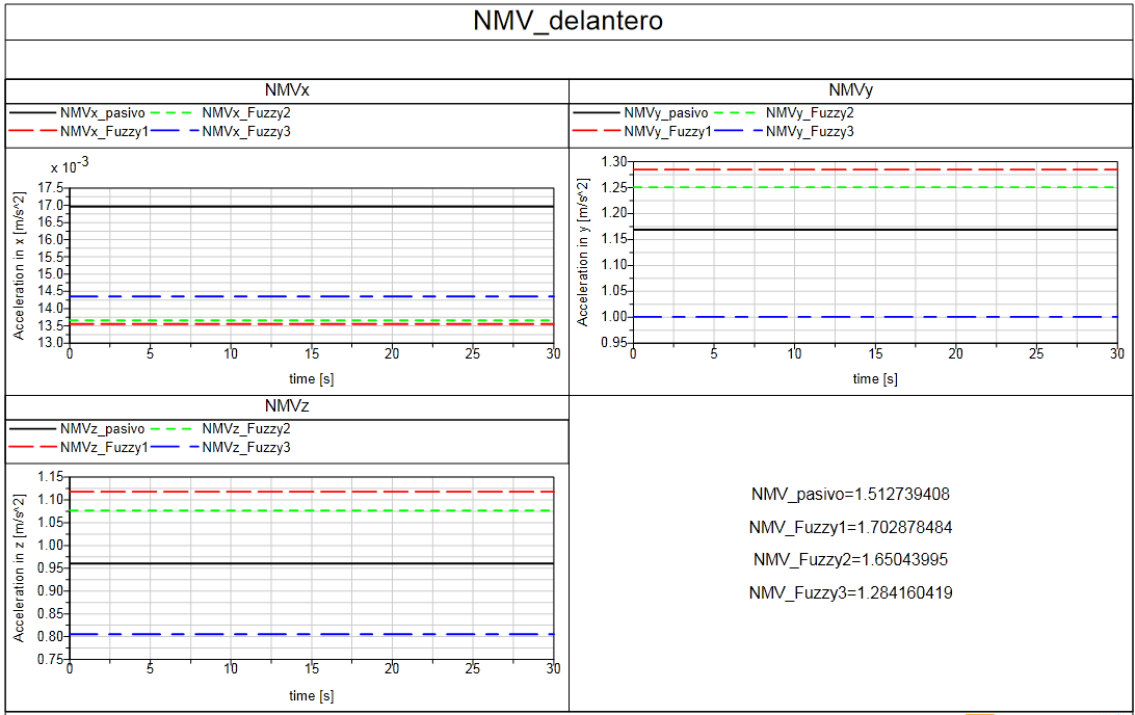


Figura 8.26 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 3

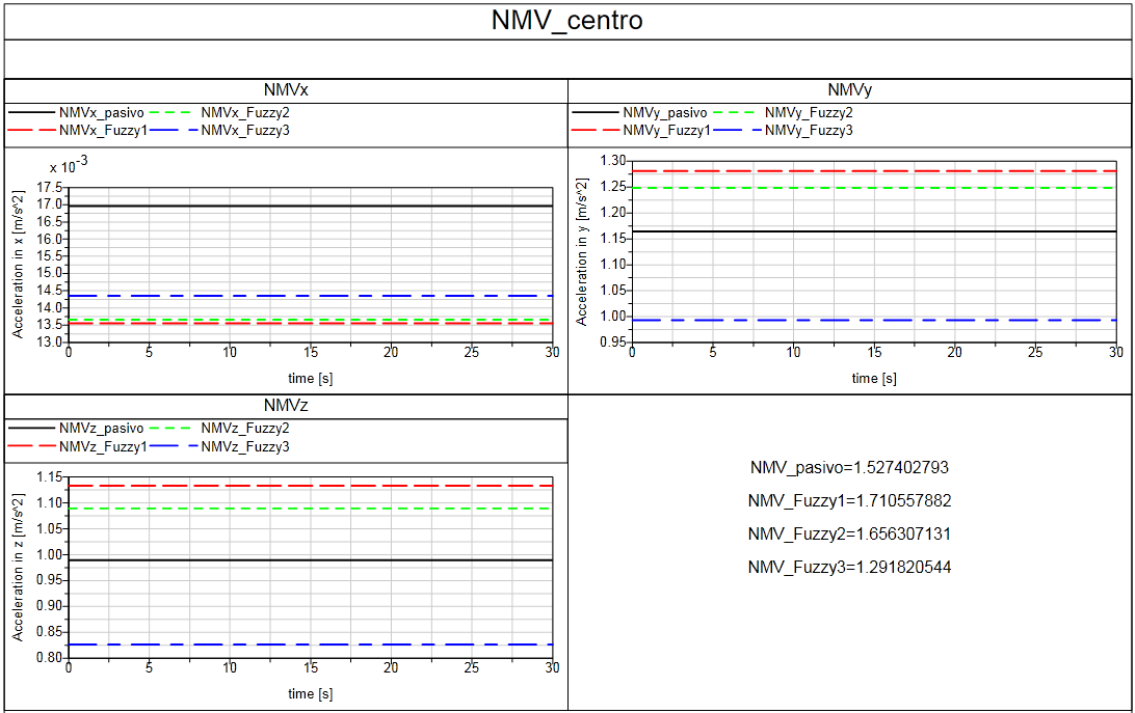


Figura 8.27 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 3

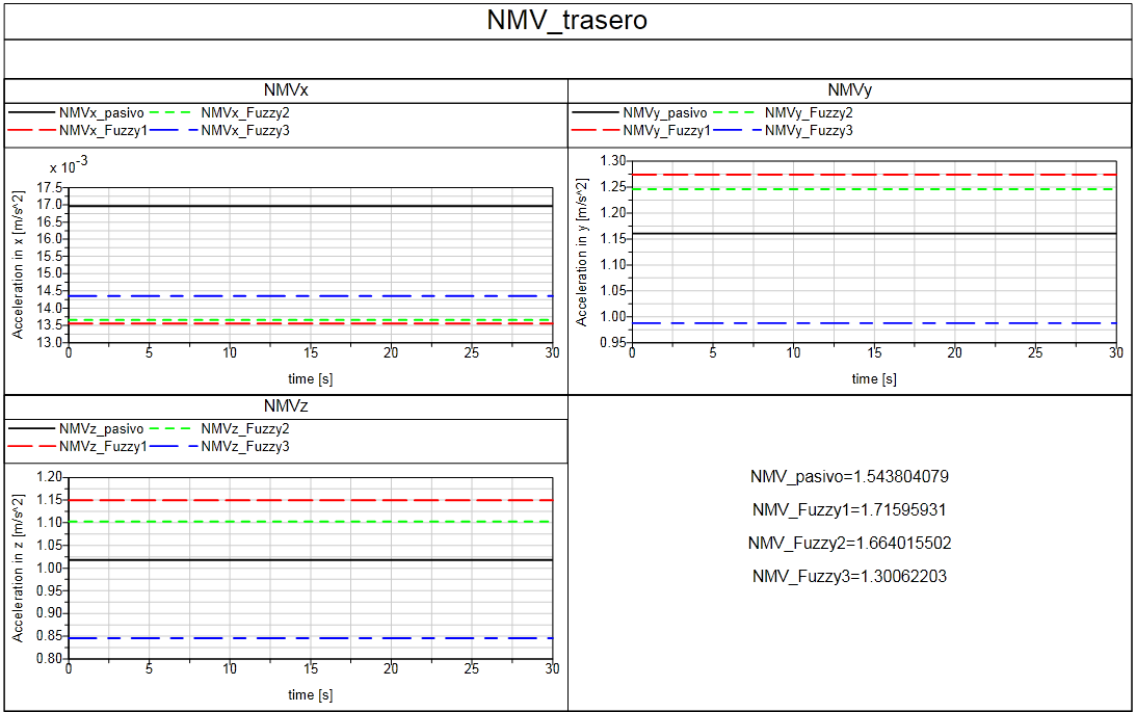


Figura 8.28 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 3

Efectivamente, al haber incrementado la fuerza en los actuadores, se ha mejorado sustancialmente el índice de comodidad reduciéndose alrededor de un 15% (ver tabla 8.6).

Tabla 8.6 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 3 vs Susp.Pasiva

	NMV_Pasivo	NMV_Fuzzy_3	%
NMV _{DELANTERO}	1,512739408	1,284160419	15,11%
NMV _{CENTRO}	1,527402793	1,291820544	15,42%
NMV _{TRASERO}	1,543804079	1,30062203	15,75%

Por tanto, esta suspensión activa es una buena solución que mejora considerablemente el confort del viajero, en relación a la suspensión pasiva de partida.

■ Suspensión activa 4

Una vez se han obtenido mejores resultados que en la suspensión pasiva, se ha decidido cambiar las variables de entrada del controlador borroso. Se pretende ver la respuesta del vehículo con este cambio así como intentar mejorar la anterior suspensión activa.

Por ello se plantea un controlador cuyas entradas sean la velocidad y la aceleración de los puntos citados. El rango de valores para la fuerza es de -2000 a +2000 N, para la velocidad el rango de valores es igual que en los casos anteriores de -0.1 a 0.1 m/s y para la aceleración el rango de valores es de -0.7 a +0.7 m/s². En Simulink el controlador es el que se muestra en la figura 8.29.

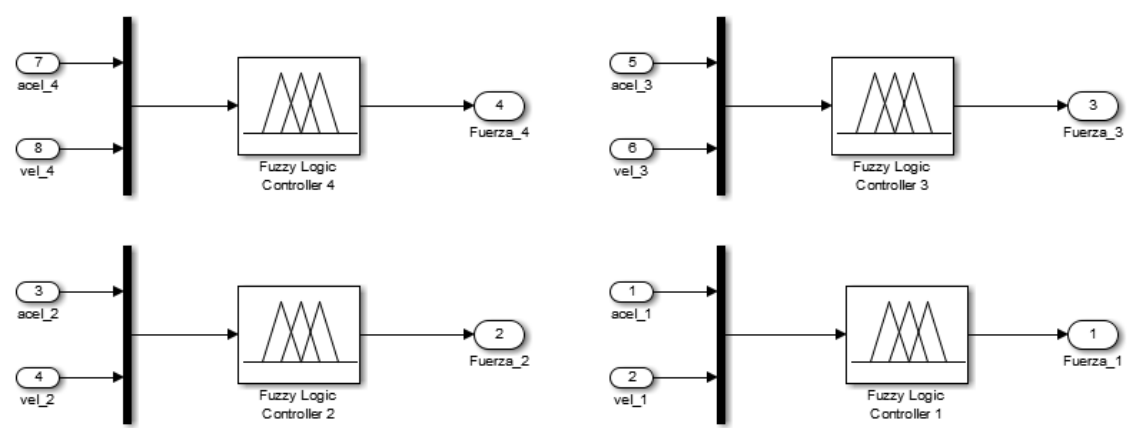


Figura 8.29 - Controlador borroso en Susp.Activa 4

Los conjuntos borrosos para la velocidad y la fuerza no han variado, mientras que para la aceleración son los que muestra la figura 8.30.

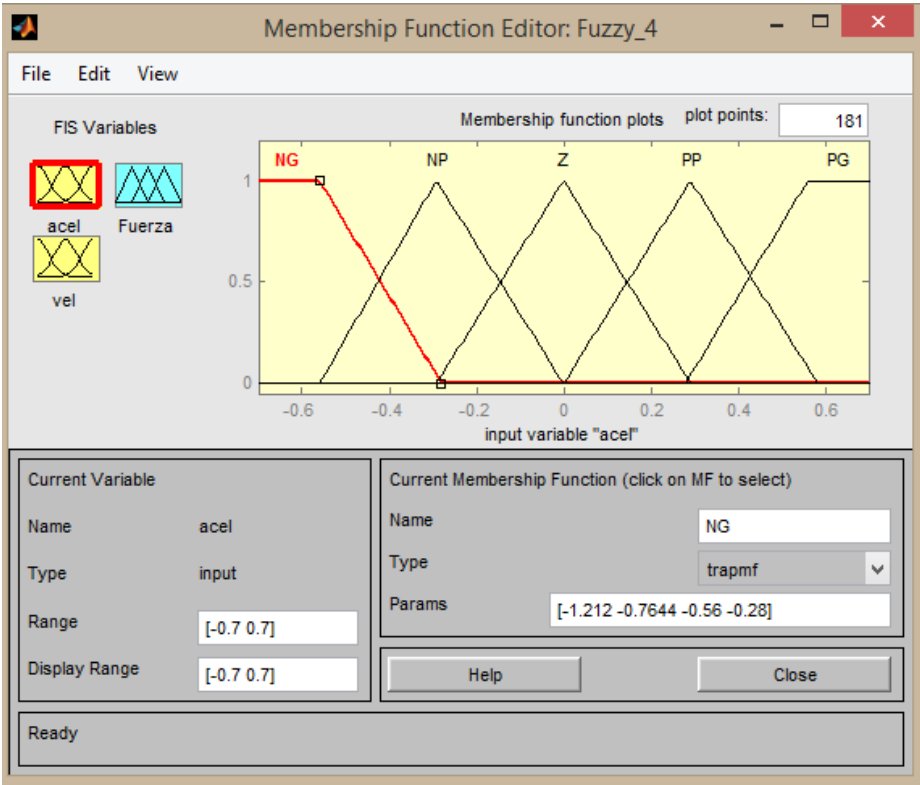


Figura 8.30 - Conjuntos borrosos para la variable aceleración

El conjunto de reglas para este caso es el que muestra la tabla 8.7.

Tabla 8.7 - Conjunto de reglas Susp.Activa 4

Regla	Acel (aceleración)	Vel (velocidad)	Fuerza
1	NG	NG	PG
2	NG	NP	PG
3	NG	Z	PP
4	NG	PP	NP

5	NG	PG	Z
6	NP	NG	PP
7	NP	NP	PG
8	NP	Z	PP
9	NP	PP	Z
10	NP	PG	NP
11	Z	NG	PG
12	Z	NP	PP
13	Z	Z	Z
14	Z	PP	NP
15	Z	PG	NG
16	PP	NG	PP
17	PP	NP	PP
18	PP	Z	NP
19	PP	PP	NG
20	PP	PG	NG
21	PG	NG	PP
22	PG	NP	PP
23	PG	Z	PP
24	PG	PP	NP
25	PG	PG	NG

La fuerza ejercida por los actuadores en este caso es la que muestra en las figuras 8.31 y 8.32.

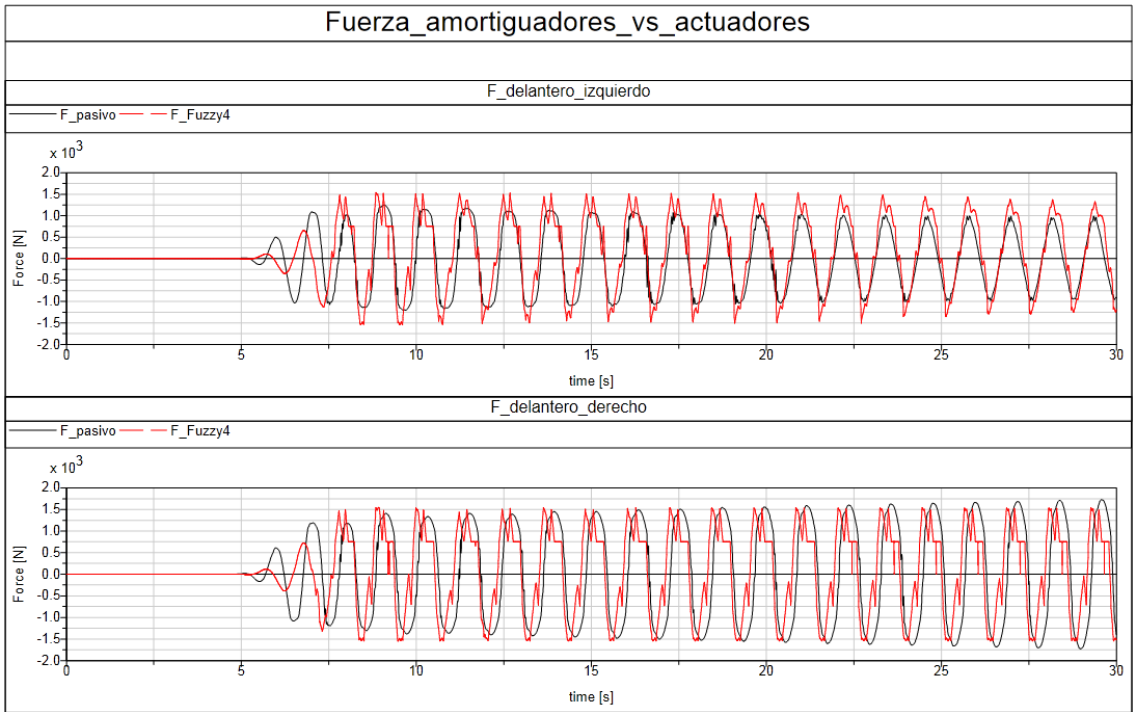


Figura 8.31 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 4

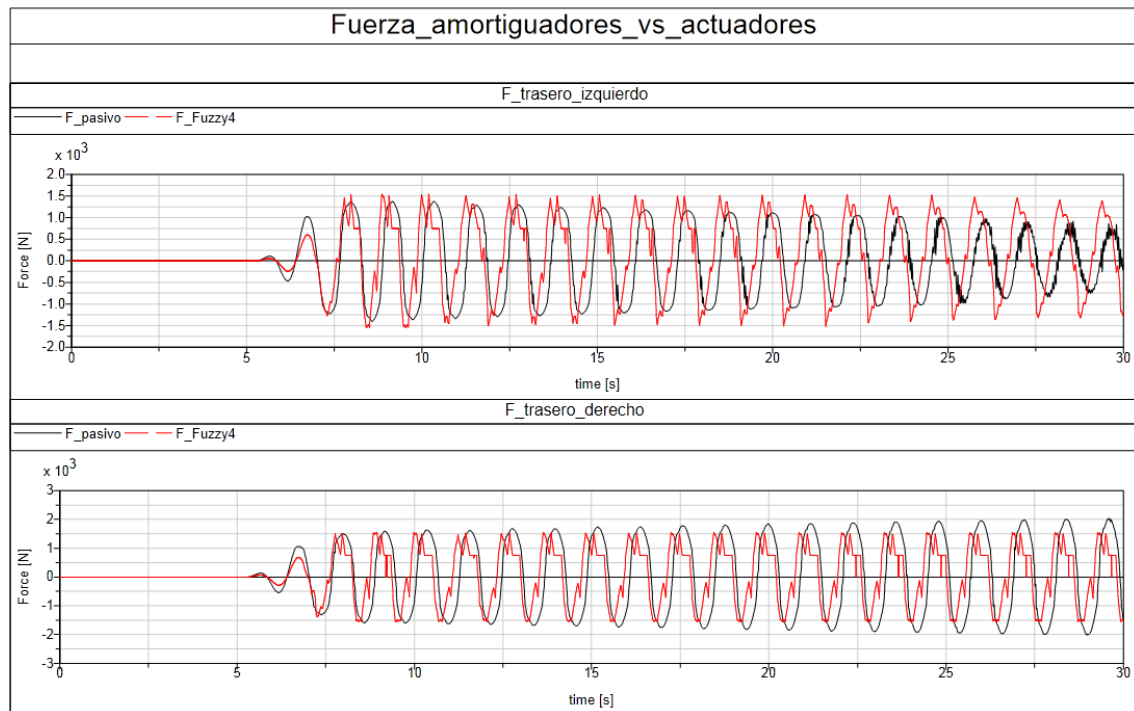


Figura 8.32 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 4

Se puede observar en las figuras 8.31 y 8.32 que la respuesta de los actuadores no se asemeja con el mismo grado a la suspensión pasiva, como sí lo hacía en la suspensión activa 1. Cabe esperar que los resultados sean diferentes y de peor calidad respecto a las anteriores suspensiones activas planteadas.

Las figuras 8.33, 8.34 y 8.35 muestran los índices de comodidad para el sistema de suspensión activa 4.

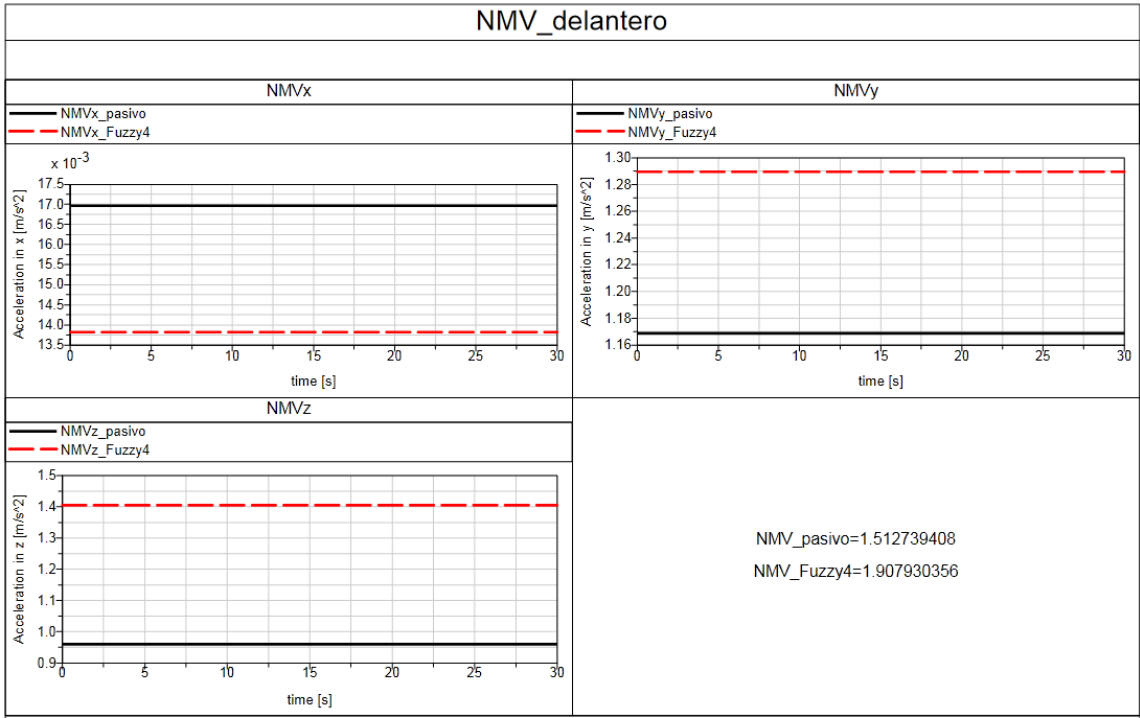


Figura 8.33 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 4

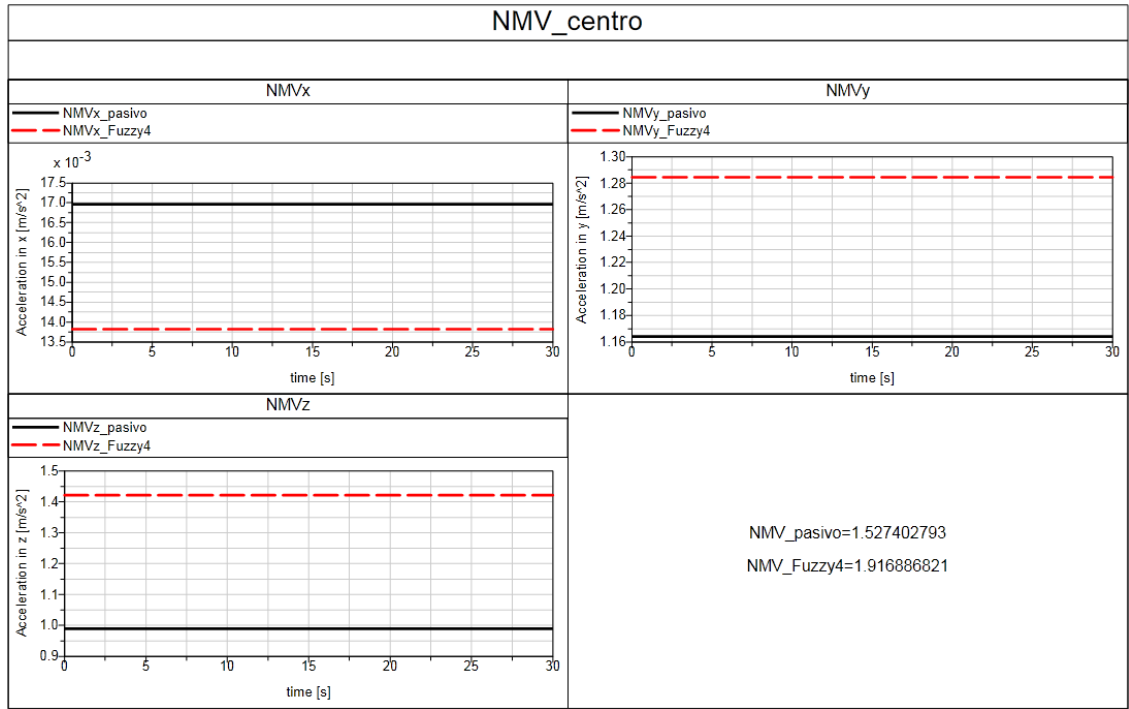


Figura 8.34 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 4

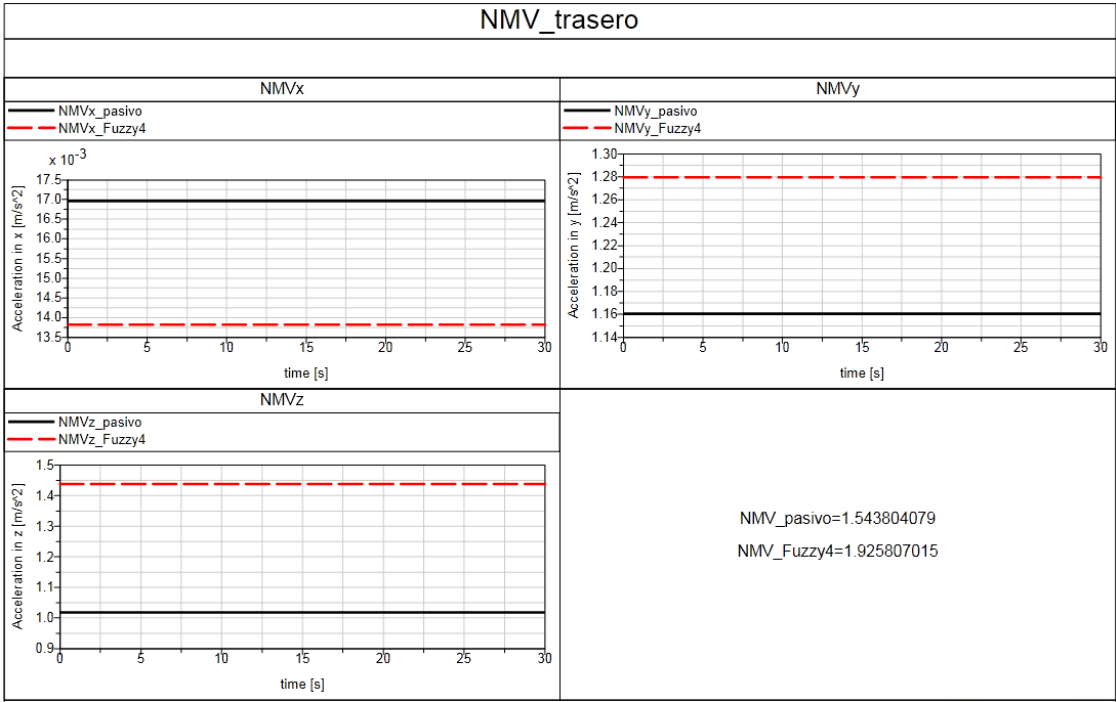


Figura 8.35 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 4

Los resultados obtenidos son un 25% peor respecto a la suspensión pasiva de partida. Además esta suspensión también es peor que la suspensión activa 1 (ver tabla 8.8). Por tanto, la aceleración como variable de entrada del controlador no supone, a priori, una buena elección.

Tabla 8.8 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 4 vs Susp.Pasiva

	NMV_Pasivo	NMV_Fuzzy_4	%
NMV _{DELANTERO}	1,512739408	1,907930356	-26,12%
NMV _{CENTRO}	1,527402793	1,916886821	-25,50%
NMV _{TRASERO}	1,543804079	1,925807015	-24,74%

■ Suspensión activa 5

Siguiendo con el mismo razonamiento que cuando se ha utilizado la posición y la velocidad como variables de entrada, se aumenta el rango de la fuerza para mejorar los resultados. El rango elegido es de ± 5000 N, ya que para ese valor se obtuvieron buenos resultados anteriormente.

La fuerza ejercida por los actuadores en este caso es la que muestra en las figuras 8.36 y 8.37.

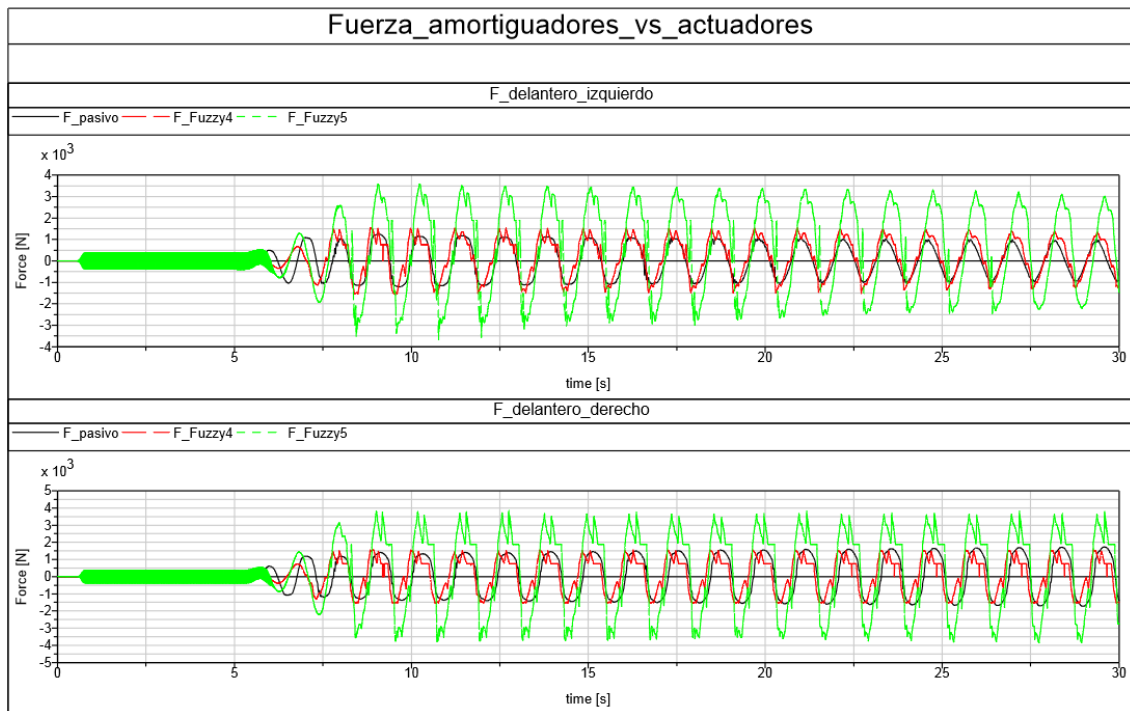


Figura 8.36 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 5

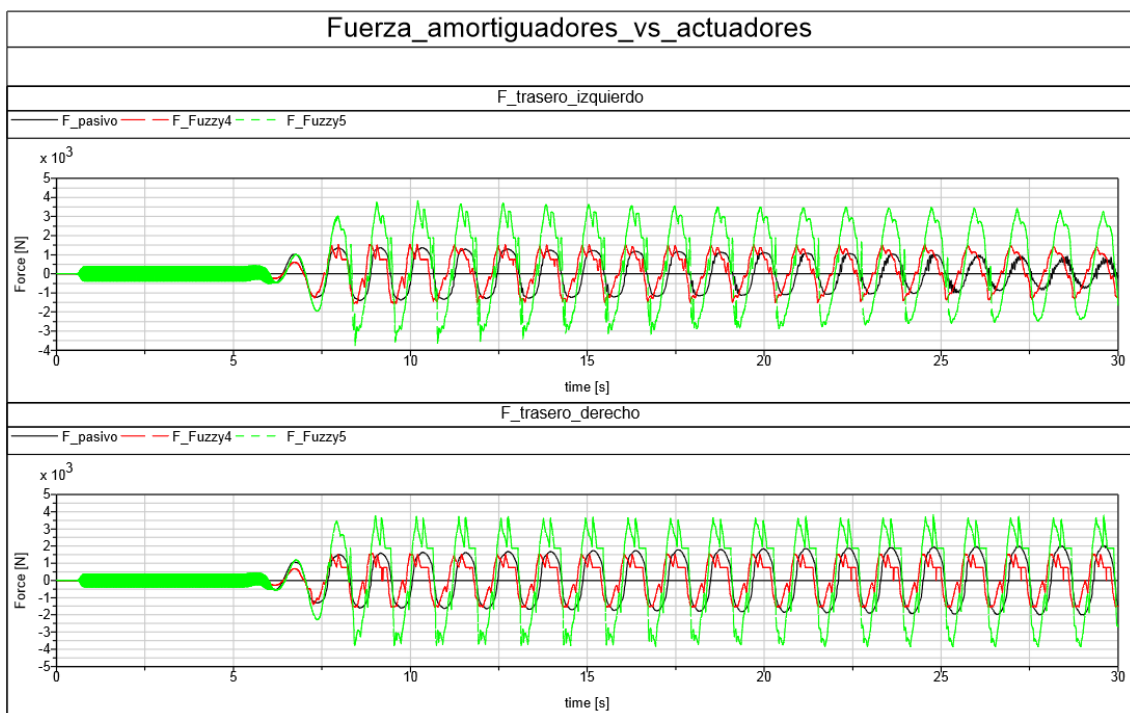


Figura 8.37 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 5

Las figuras 8.38, 8.39 y 8.40 muestran los índices de comodidad para el sistema de suspensión activa 5.

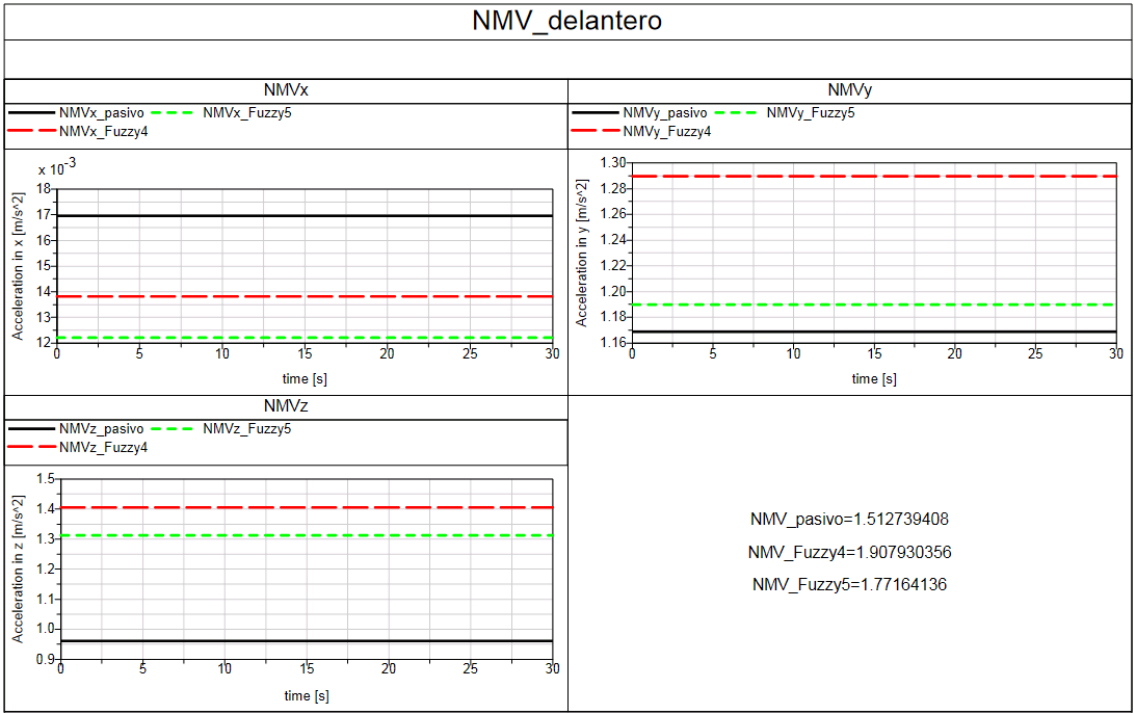


Figura 8.38 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 5

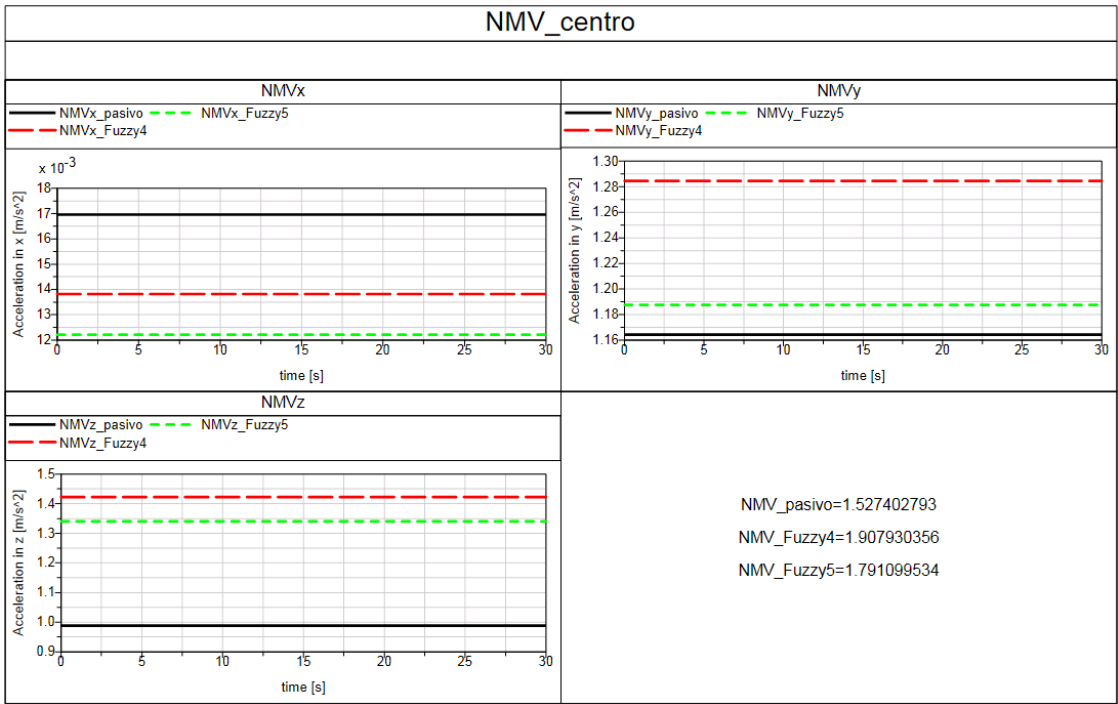


Figura 8.39 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 5

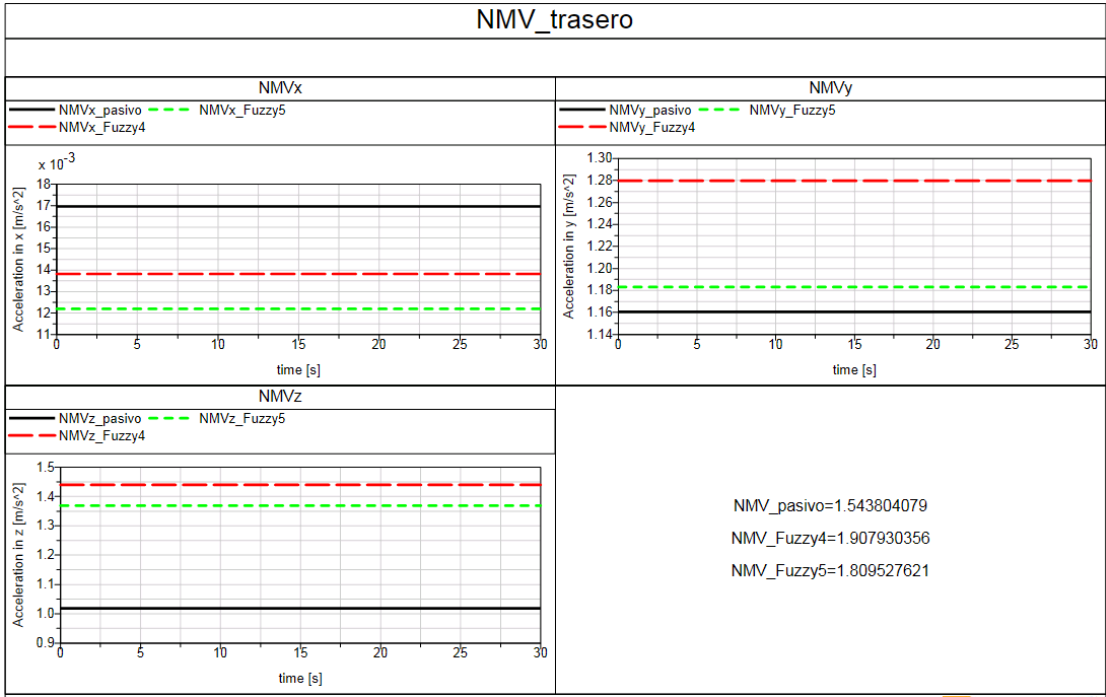


Figura 8.40 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 5

Al contrario que en el controlador que utiliza la posición y la velocidad como variables de entrada, en este caso a pesar de haber incrementado la fuerza de los actuadores no se obtiene una mejora significativa del índice de comodidad (ver tabla 8.9). Bien es cierto, que se mejoran los índices de comodidad en sentido longitudinal y transversal (x e y respectivamente) pero en cuanto al eje vertical no se mejora sustancialmente.

Otro aspecto a destacar de estos resultados es la respuesta de los actuadores en ausencia de irregularidad. En los casos anteriores no se ejercía ninguna fuerza hasta que se llegaba al tramo con irregularidad, sin embargo en este caso se observa en las figuras 8.36 y 8.37 que los actuadores ejercen una fuerza de un valor oscilante entre ± 500 N. Esto indica que las reglas planteadas no son las más adecuadas. Por ello, los índices de comodidad son inferiores en un 17% aproximadamente a la suspensión pasiva planteada al inicio de este proyecto (ver tabla 8.9).

Tabla 8.9 - Comparación resultados NMV Susp. Activa 5 vs Susp. Pasiva

	NMV_Pasivo	NMV_Fuzzy_5	%
NMV _{DELANTERO}	1,512739408	1,77164136	-17,11%
NMV _{CENTRO}	1,527402793	1,791099534	-17,26%
NMV _{TRASERO}	1,543804079	1,809527621	-17,21%

■ Suspensión activa 6

Para intentar mejorar el resultado anterior y reducir la fuerza de los actuadores en los primeros 6 segundos de simulación se han cambiado alguna de las reglas, haciendo así que la respuesta no sea tan fuerte ante aceleraciones y velocidades pequeñas. Las reglas quedan como se muestra en la tabla 8.10.

Tabla 8.10 - Conjunto reglas Susp.Activa 6

Regla	Acel (aceleración)	Vel (velocidad)	Fuerza
1	NG	NG	PG
2	NG	NP	PG
3	NG	Z	PP
4	NG	PP	NP
5	NG	PG	Z
6	NP	NG	PP
7	NP	NP	PG
8	NP	Z	PP
9	NP	PP	Z
10	NP	PG	NP
11	Z	NG	PG
12	Z	NP	Z
13	Z	Z	Z
14	Z	PP	Z
15	Z	PG	NG
16	PP	NG	PP
17	PP	NP	Z
18	PP	Z	Z
19	PP	PP	Z
20	PP	PG	NG
21	PG	NG	PP
22	PG	NP	PP
23	PG	Z	PP
24	PG	PP	NP
25	PG	PG	NG

La fuerza ejercida por los actuadores en este caso es la que muestra en las figuras 8.41 y 8.42.

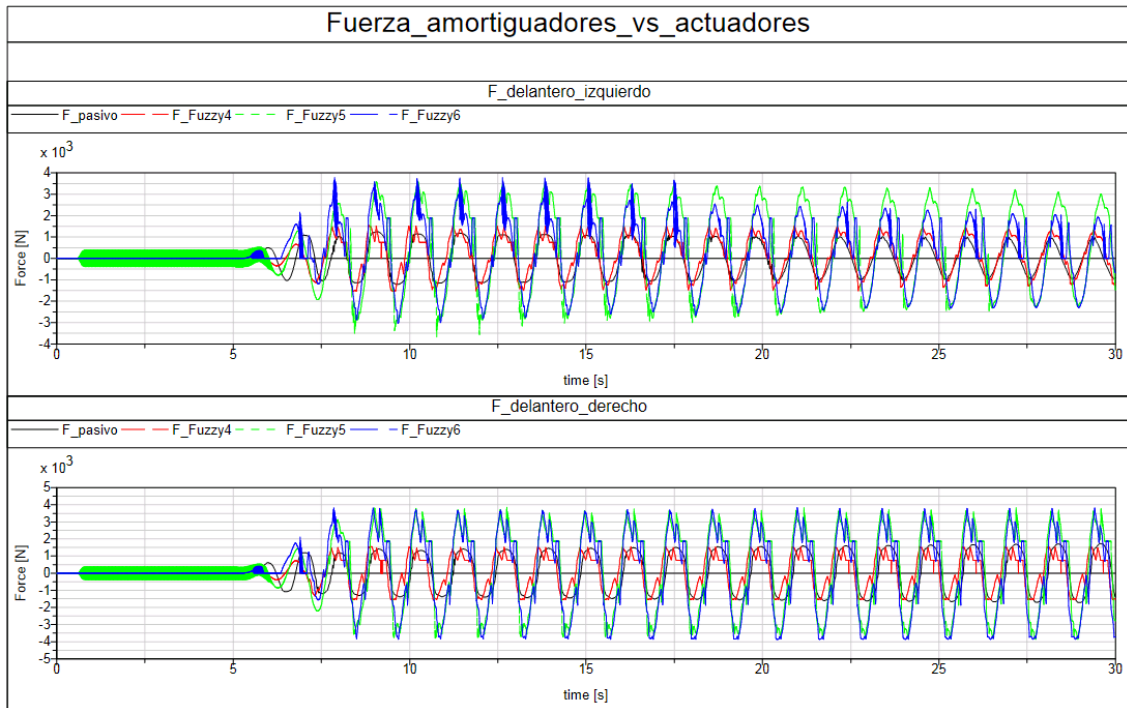


Figura 8.41 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 6

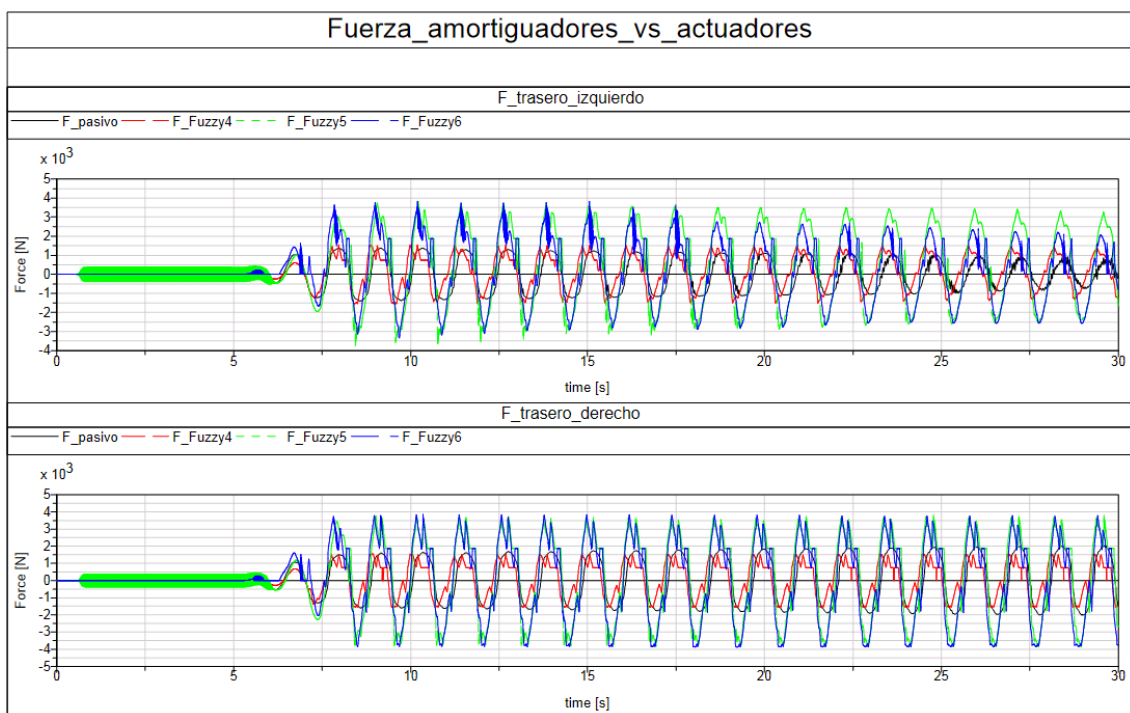


Figura 8.42 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 6

Efectivamente, la respuesta de las actuadores ha cambiado en el tramo de 1 a 6 segundos aproximadamente. Esta vez, la fuerza proporcionada por los actuadores es nula o cercana a cero como en los primeros casos planteados.

Sin embargo, no se ha mejorado el confort del viajero como se muestra en las siguientes gráficas de las figuras 8.43, 8.44 y 8.45.

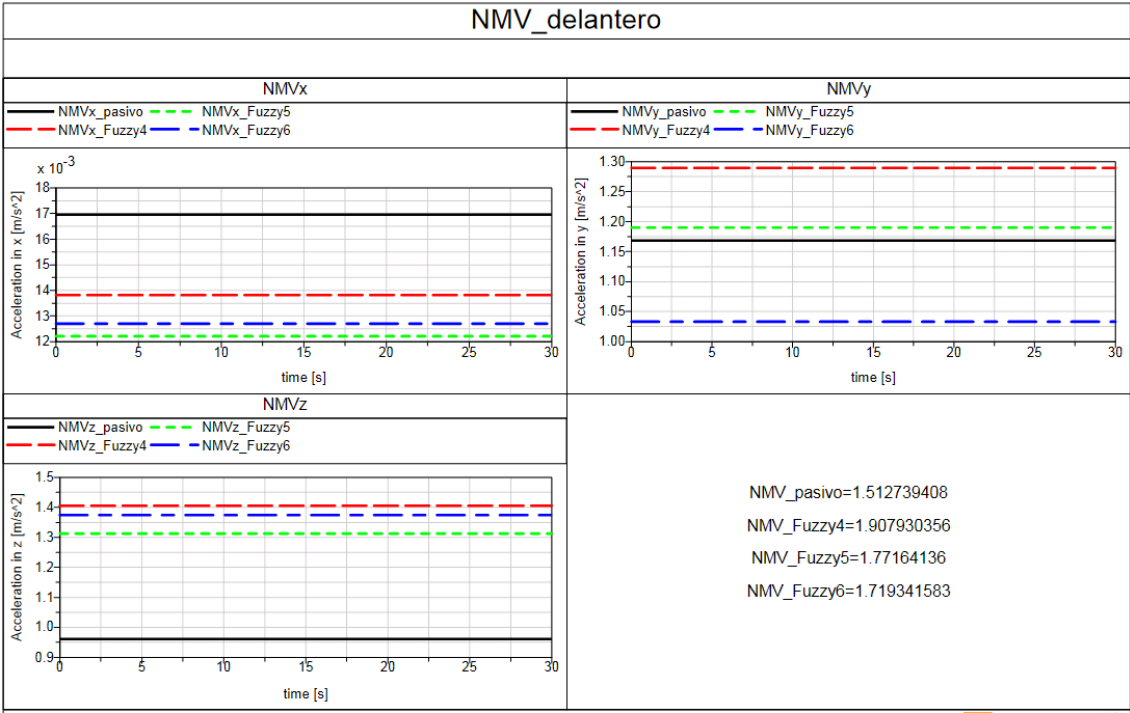


Figura 8.43 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 6

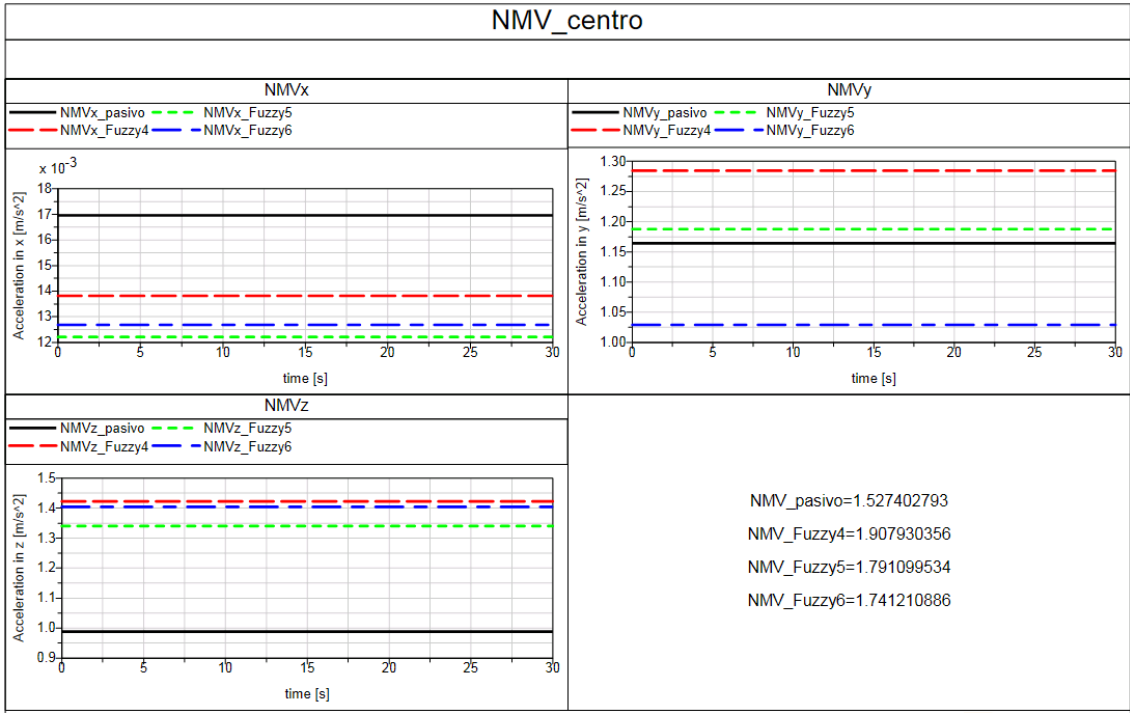


Figura 8.44 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 6

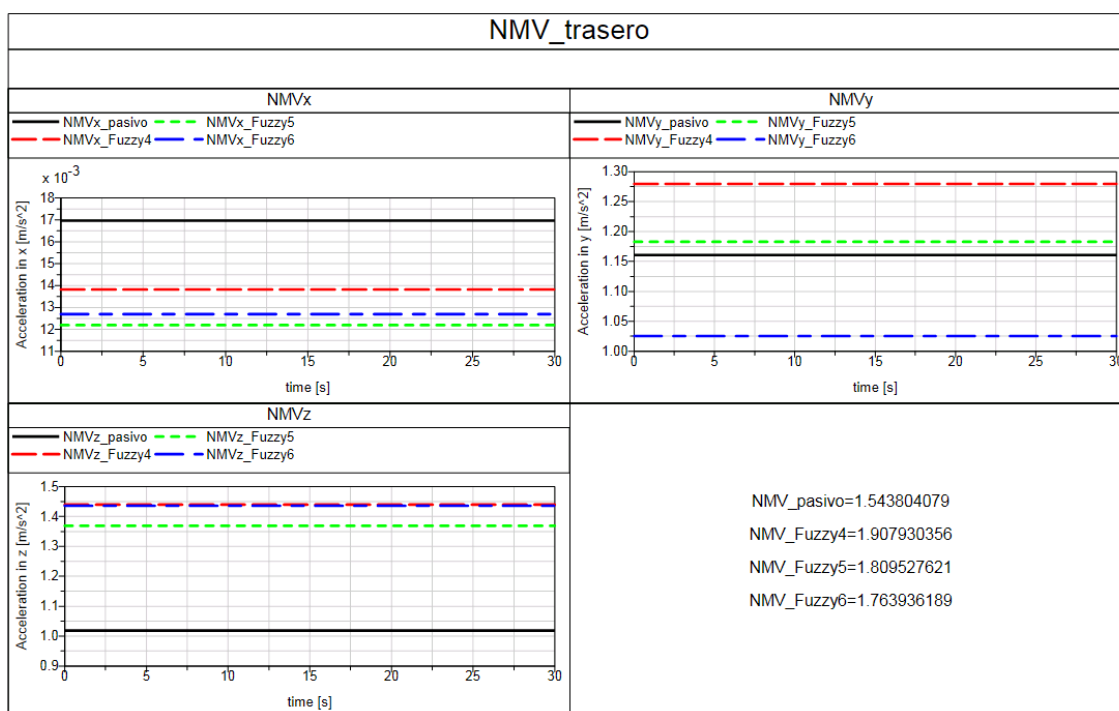


Figura 8.45 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 6

A pesar de los cambios realizados no se ha mejorado significativamente respecto a la suspensión activa 5 y continúa siendo peor que la suspensión pasiva (ver tabla 8.10).

Tabla 8.10 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 6 vs Susp.Pasiva

	NMV_Pasivo	NMV_Fuzzy_6	%
NMV_{DELANTERO}	1,512739408	1,719341583	-13,66%
NMV_{CENTRO}	1,527402793	1,741210886	-14,00%
NMV_{TRASERO}	1,543804079	1,763936189	-14,26%

Por tanto, esta suspensión tampoco supone una mejora respecto a la suspensión pasiva y a pesar de haber aumentado la fuerza ejercida por los actuadores, el confort no ha mejorado sustancialmente. Se podría seguir aumentando el rango de actuación de los mismos pero no sería una opción demasiado viable en comparación a la suspensión activa 3.

▪ Suspensión activa 7

De los casos anteriores se puede concluir que tomar como variables de entrada la posición y la velocidad genera buenos resultados, mientras que incluir la aceleración no parece una buena opción. A partir de estos resultados se propone a continuación un controlador borroso con 3 entradas: posición, velocidad y aceleración.

El conjunto de reglas aumenta lógicamente, al introducir una nueva variable de entrada. En la tabla 8.11 aparecen las 125 reglas que representan todos los casos posibles que se pueden dar lugar.

Tabla 8.11 - Conjunto de reglas Susp.Activa 7

Regla	Acel (aceleración)	Vel (velocidad)	Pos (posición)	Fuerza
1	NG	NG	NG	PG
2	NG	NG	NP	PG
3	NG	NG	Z	PG
4	NG	NG	PP	PP
5	NG	NG	PG	PP
6	NG	NP	NG	PG
7	NG	NP	NP	PG
8	NG	NP	Z	PP
9	NG	NP	PP	PP
10	NG	NP	PG	PP
11	NG	Z	NG	PG
12	NG	Z	NP	PG
13	NG	Z	Z	PP
14	NG	Z	PP	PP
15	NG	Z	PG	PP
16	NG	PP	NG	PP
17	NG	PP	NP	PP
18	NG	PP	Z	PP
19	NG	PP	PP	Z
20	NG	PP	PG	Z
21	NG	PG	NG	NP
22	NG	PG	NP	NP
23	NG	PG	Z	NP
24	NG	PG	PP	Z
25	NG	PG	PG	Z
26	NP	NG	NG	PG
27	NP	NG	NP	PG
28	NP	NG	Z	PP
29	NP	NG	PP	PP
30	NP	NG	PG	PP
31	NP	NP	NG	PG
32	NP	NP	NP	PP
33	NP	NP	Z	PP
34	NP	NP	PP	PP

35	NP	NP	PG	PP
36	NP	Z	NG	PG
37	NP	Z	NP	PP
38	NP	Z	Z	Z
39	NP	Z	PP	PP
40	NP	Z	PG	NP
41	NP	PP	NG	Z
42	NP	PP	NP	Z
43	NP	PP	Z	NP
44	NP	PP	PP	NP
45	NP	PP	PG	NG
46	NP	PG	NG	NP
47	NP	PG	NP	NP
48	NP	PG	Z	NG
49	NP	PG	PP	NP
50	NP	PG	PG	NG
51	Z	NG	NG	PG
52	Z	NG	NP	PG
53	Z	NG	Z	PP
54	Z	NG	PP	PP
55	Z	NG	PG	PP
56	Z	NP	NG	PG
57	Z	NP	NP	PG
58	Z	NP	Z	Z
59	Z	NP	PP	PP
60	Z	NP	PG	PP
61	Z	Z	NG	PP
62	Z	Z	NP	Z
63	Z	Z	Z	Z
64	Z	Z	PP	NP
65	Z	Z	PG	PP
66	Z	PP	NG	PP
67	Z	PP	NP	Z
68	Z	PP	Z	NP
69	Z	PP	PP	NP
70	Z	PP	PG	NP
71	Z	PG	NG	PP
72	Z	PG	NP	NP
73	Z	PG	Z	NP
74	Z	PG	PP	NG
75	Z	PG	PG	NG

76	PP	NG	NG	PG
77	PP	NG	NP	PP
78	PP	NG	Z	PP
79	PP	NG	PP	PP
80	PP	NG	PG	Z
81	PP	NP	NG	PG
82	PP	NP	NP	PP
83	PP	NP	Z	Z
84	PP	NP	PP	Z
85	PP	NP	PG	PP
86	PP	Z	NG	PP
87	PP	Z	NP	PP
88	PP	Z	Z	NP
89	PP	Z	PP	NP
90	PP	Z	PG	NG
91	PP	PP	NG	PP
92	PP	PP	NP	Z
93	PP	PP	Z	NP
94	PP	PP	PP	NP
95	PP	PP	PG	NG
96	PP	PG	NG	NG
97	PP	PG	NP	NG
98	PP	PG	Z	NG
99	PP	PG	PP	NG
100	PP	PG	PG	NG
101	PG	NG	NG	PG
102	PG	NG	NP	PP
103	PG	NG	Z	PP
104	PG	NG	PP	PP
105	PG	NG	PG	Z
106	PG	NP	NG	PG
107	PG	NP	NP	PP
108	PG	NP	Z	Z
109	PG	NP	PP	Z
110	PG	NP	PG	NP
111	PG	Z	NG	NP
112	PG	Z	NP	NP
113	PG	Z	Z	NP
114	PG	Z	PP	NP
115	PG	Z	PG	NG
116	PG	PP	NG	NP

117	PG	PP	NP	Z
118	PG	PP	Z	NP
119	PG	PP	PP	NG
120	PG	PP	PG	NG
121	PG	PG	NG	Z
122	PG	PG	NP	NP
123	PG	PG	Z	NG
124	PG	PG	PP	NG
125	PG	PG	PG	NG

El controlador borroso en este caso es el que se muestra en la figura 8.47 y los conjuntos borrosos son los mismos y del mismo valor que en los casos anteriores. Los rangos para las variables de entrada son: $\pm 0.7 \text{ m/s}^2$ para la aceleración, $\pm 0.13 \text{ m/s}$ para la velocidad y $\pm 0.025 \text{ m}$ para la posición. Para la variable de salida, la fuerza, el rango se ha establecido en $\pm 2000 \text{ N}$.

Siguiendo el mismo esquema que en los casos anteriores, en las figuras 8.48 y 8.49 se muestran los resultados para la fuerza en los actuadores y las figuras 8.50, 8.51 y 8.52, los índices de comodidad correspondientes a los 3 puntos de medida.

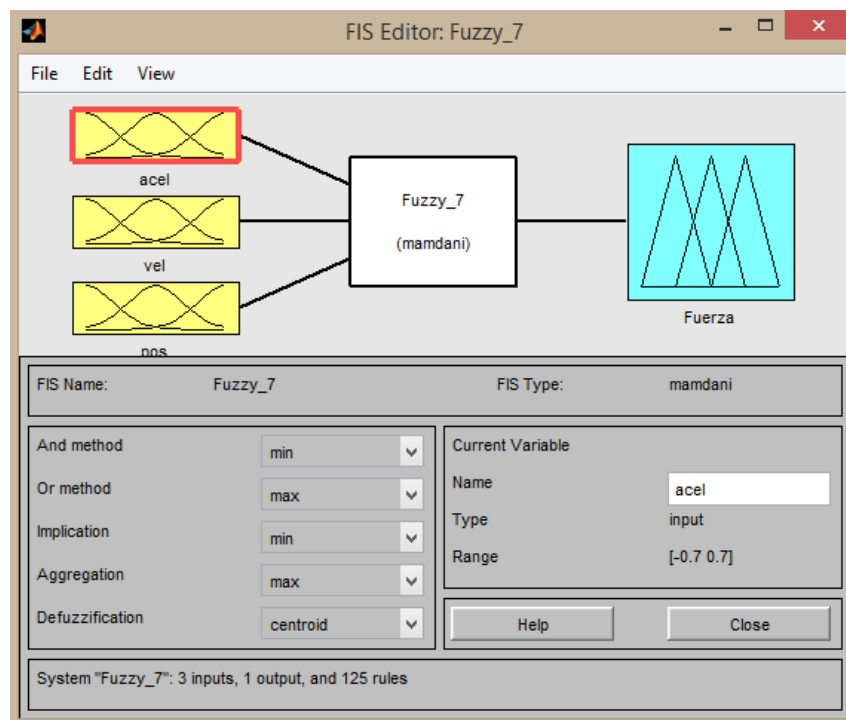


Figura 8.46 - Controlador borroso en Susp.Activa 7

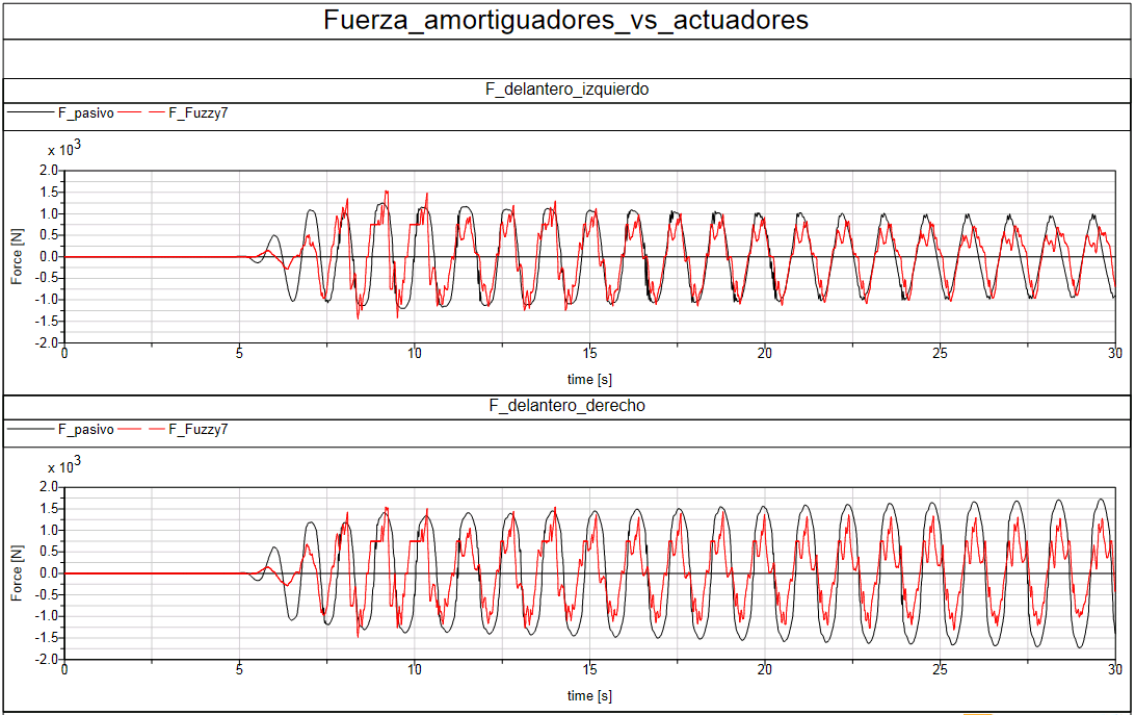


Figura 8.47 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 7

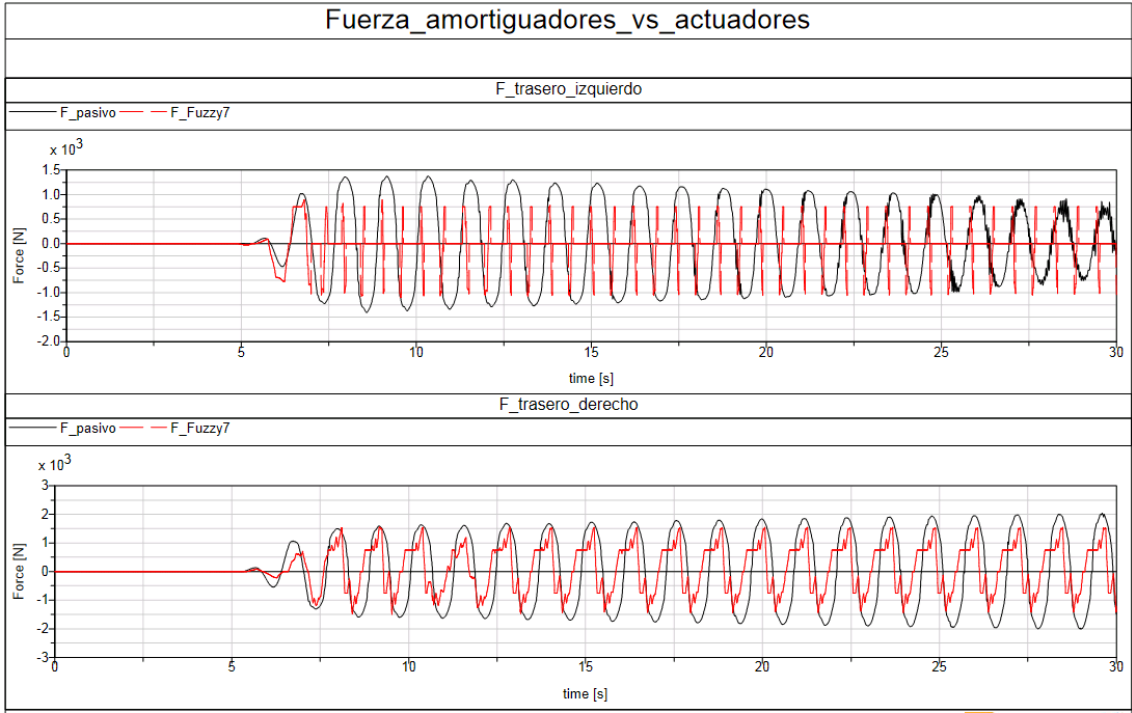


Figura 8.48 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 7

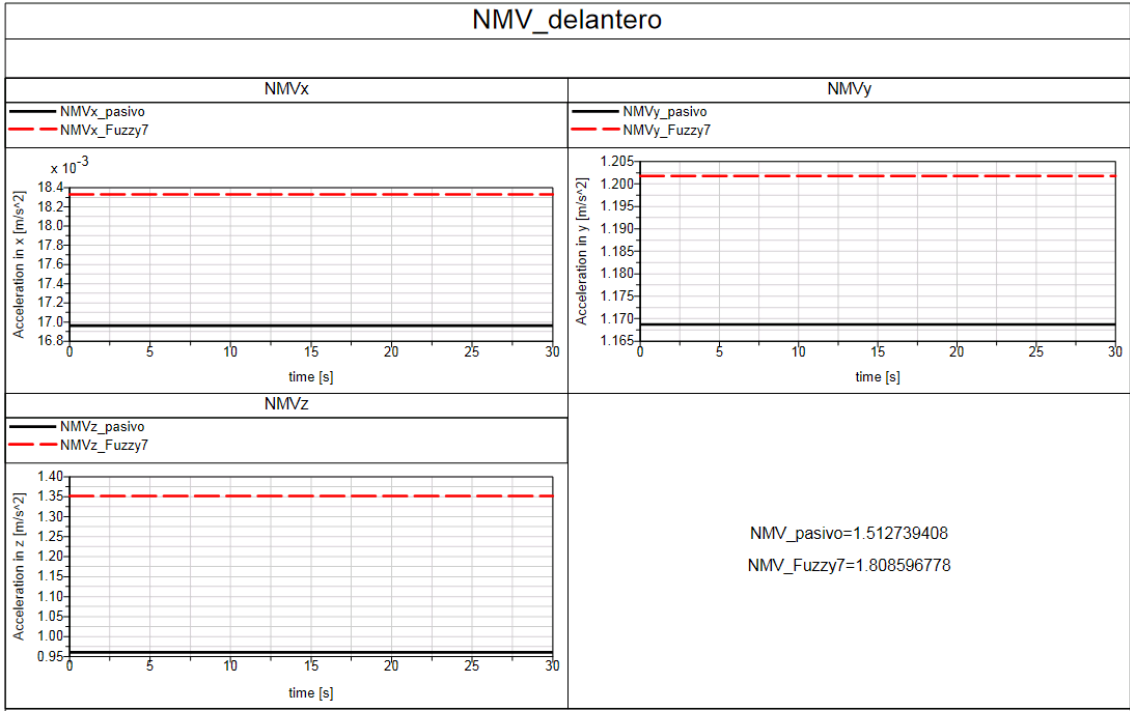


Figura 8.49 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 7

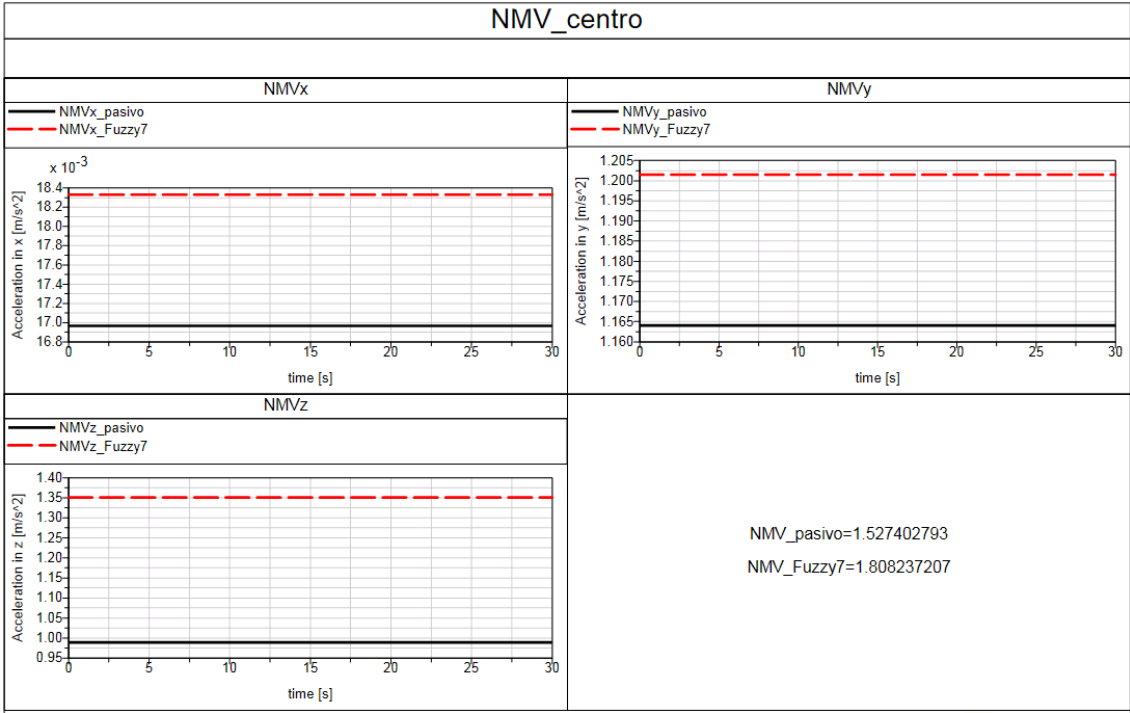


Figura 8.50 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 7

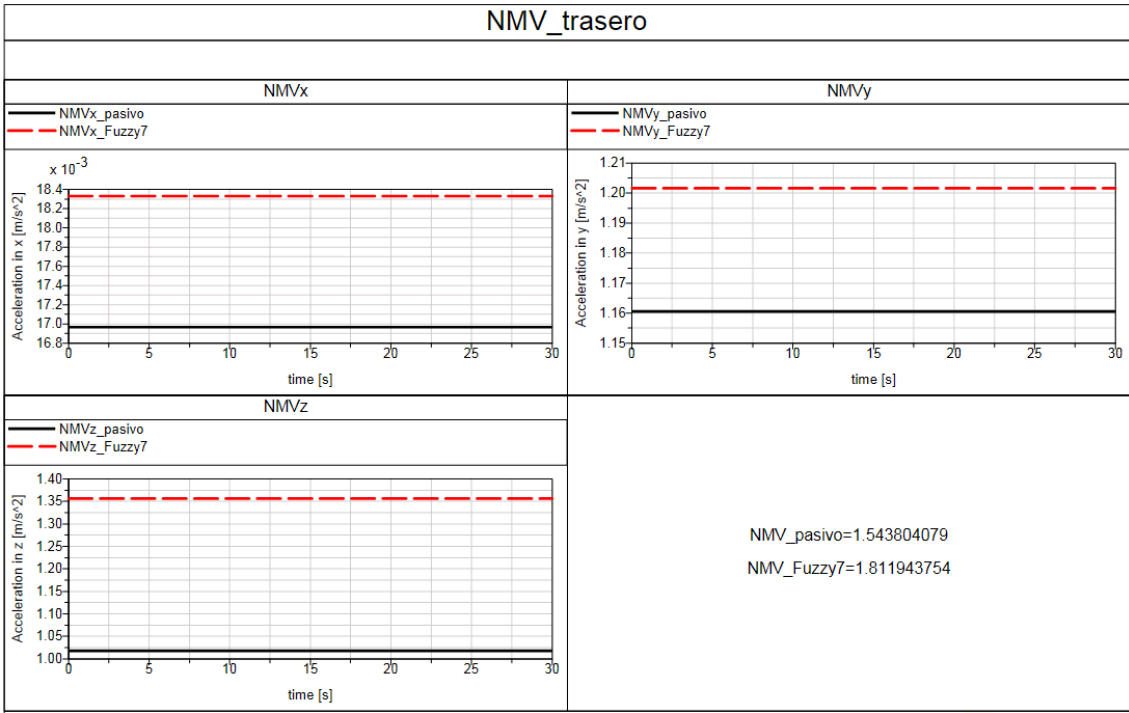


Figura 8.51 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 7

Según los resultados obtenidos, se puede prever que de nuevo la aceleración afecta negativamente al proceso de control. Los índices de comodidad son superiores al caso de la suspensión pasiva (20% aproximadamente) y por tanto, el confort es inferior (ver tabla 8.12).

Tabla 8.12 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 7 vs Susp.Pasiva

	NMV_Pasivo	NMV_Fuzzy_7	%
NMV _{DELANTERO}	1,512739408	1,80859678	-19,56%
NMV _{CENTRO}	1,527402793	1,80823721	-18,39%
NMV _{TRASERO}	1,543804079	1,81194375	-17,37%

■ Suspensión activa 8

Siguiendo las misma idea que en los anteriores casos, se propone como suspensión 8 la misma que en el caso anterior, pero con un incremento del rango de fuerza de los actuadores a ± 5000 N.

Continuando con el mismo esquema que en los casos anteriores, en las figuras 8.53 y 8.54 se muestran los resultados para la fuerza en los actuadores y las figuras 8.55, 8.56 y 8.57, los índices de comodidad correspondientes a los 3 puntos de medida.

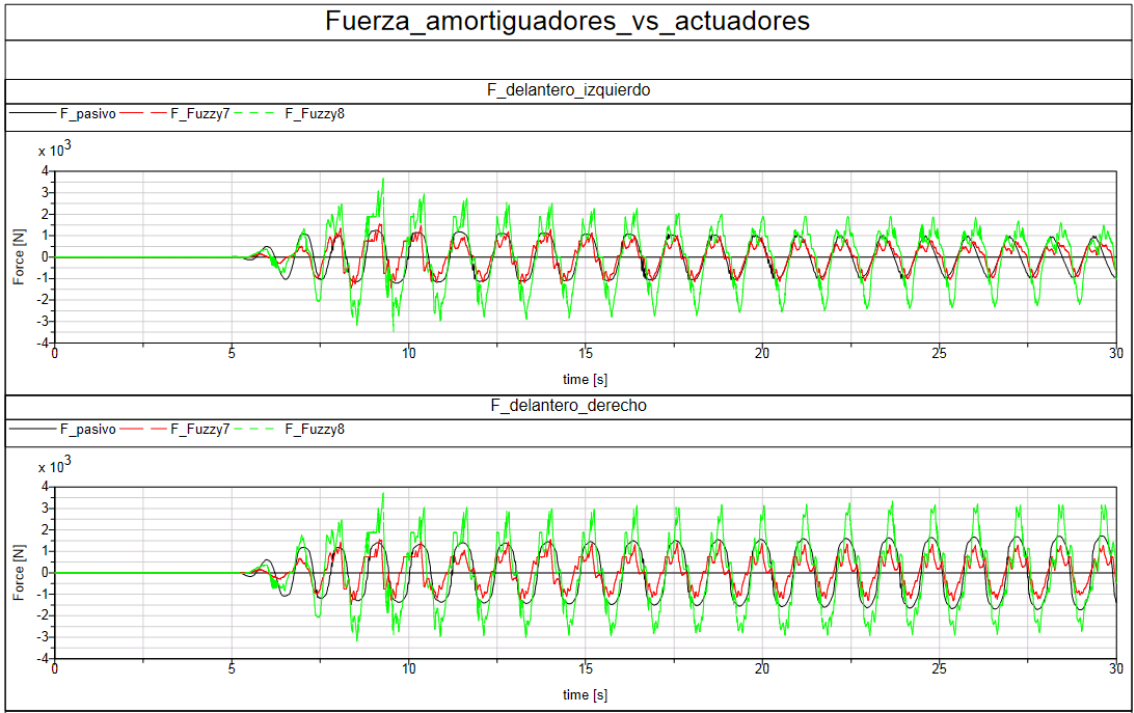


Figura 8.52 - Fuerza actuadores delanteros. Susp.Activa 8

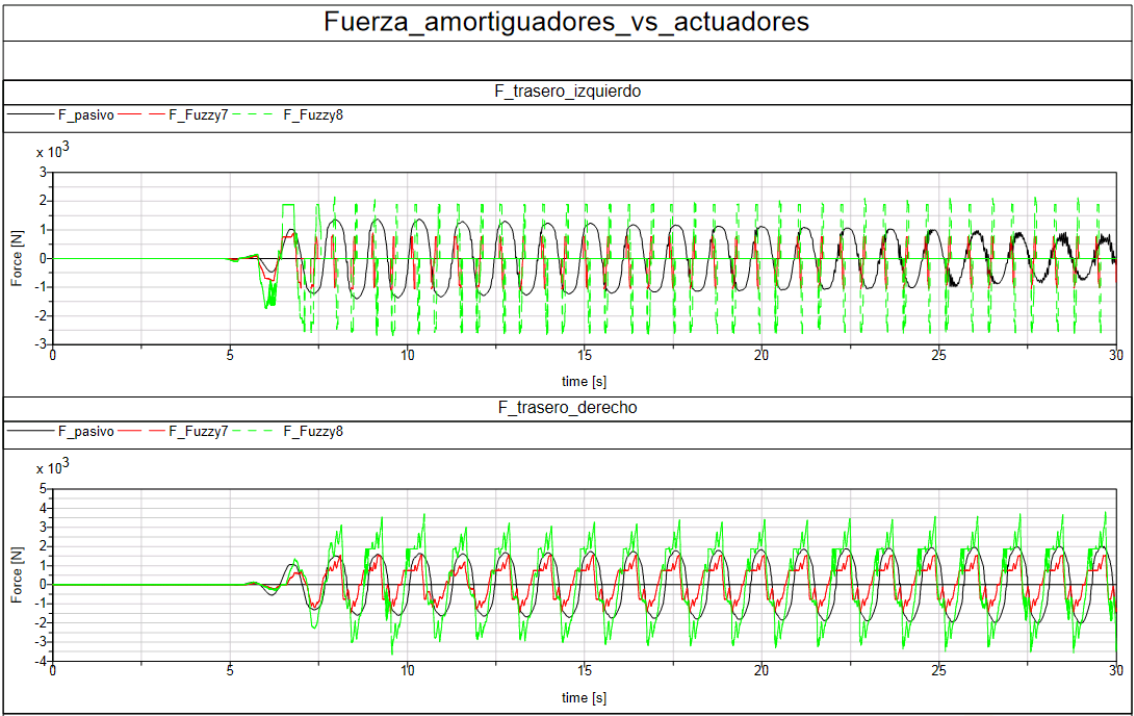


Figura 8.53 - Fuerza actuadores traseros. Susp.Activa 8

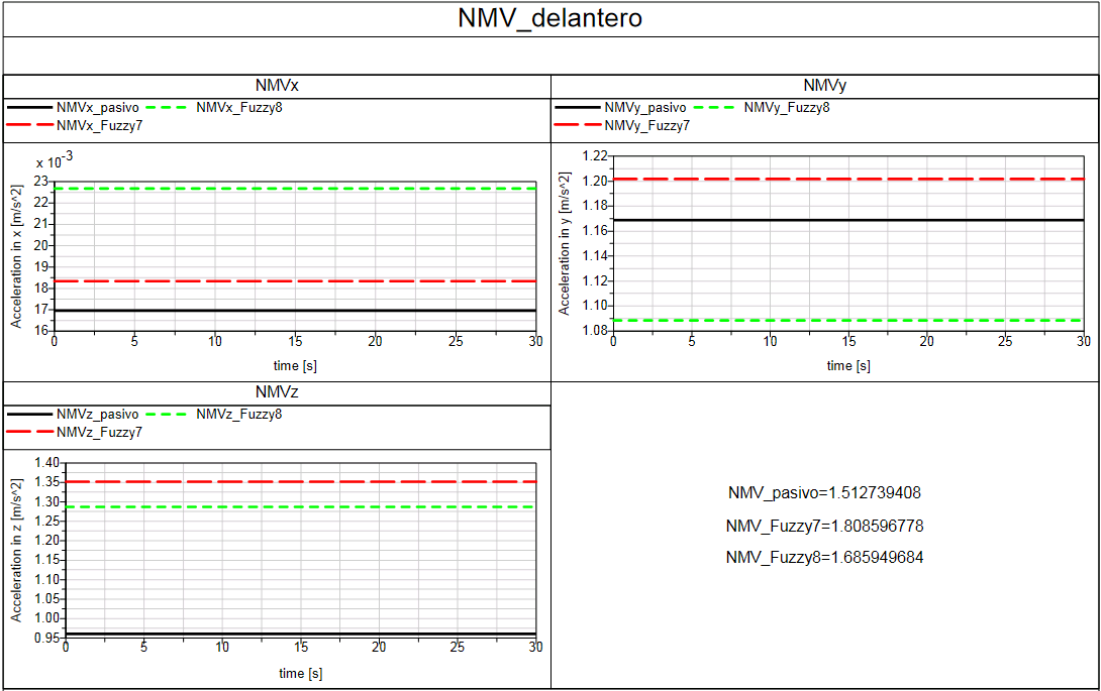


Figura 8.54 - Resultados NMV punto de medida delantero. Susp. Activa 8

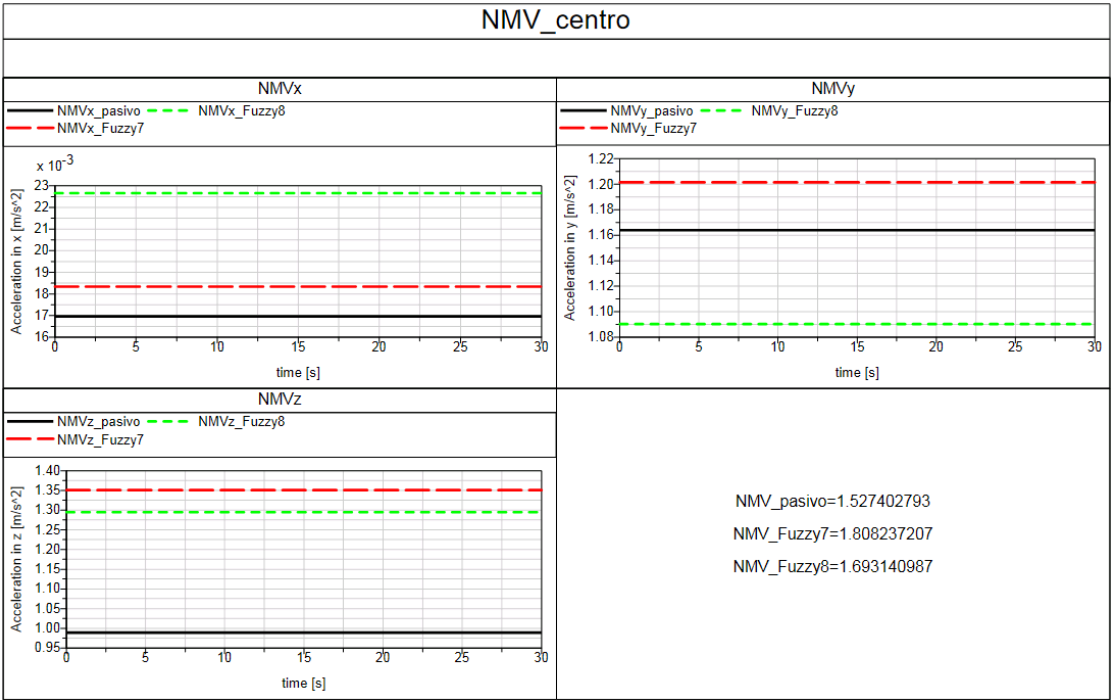


Figura 8.55 - Resultados NMV punto de medida central. Susp. Activa 8

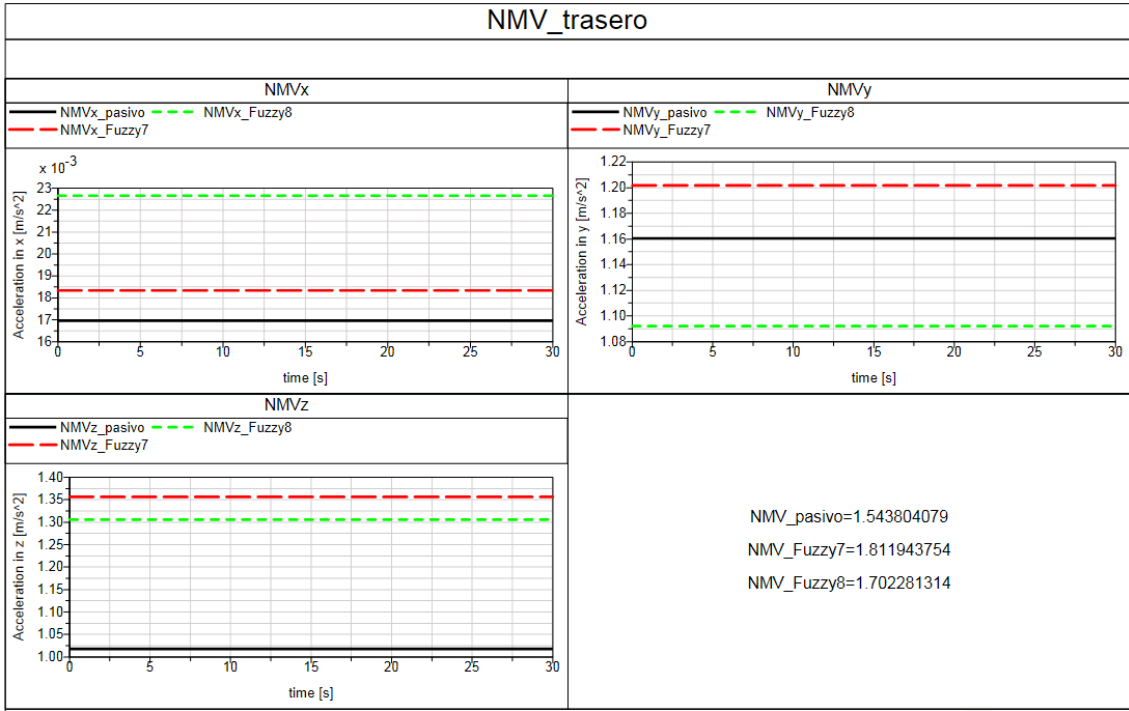


Figura 8.56 - Resultados NMV punto de medida trasero. Susp. Activa 8

Al igual que en las suspensiones activas 4, 5 y 6 la influencia de la aceleración es negativa en los resultados, pues a pesar de haber aumentado el rango de fuerza de los actuadores, los índices de comodidad siguen siendo peores que en el caso de la suspensión pasiva (ver tabla 8.13). Se podría seguir aumentando el rango de actuación de los actuadores pero requeriría mucha más energía que para la suspensión activa 3, en la que se obtenían buenos resultados con tan solo 5000 N de fuerza.

	NMV_Pasivo	NMV_Fuzzy_8	%
NMV _{DELANTERO}	1,512739408	1,68594968	-11,45%
NMV _{CENTRO}	1,527402793	1,69314099	-10,85%
NMV _{TRASERO}	1,543804079	1,70228131	-10,27%

Tabla 8.13 - Comparación resultados NMV Susp.Activa 8 vs Susp.Pasiva

Por tanto, la aceleración no parece a priori, una buena variable de entrada. Sin embargo no se descarta que con otra combinación de parámetros se puedan obtener mejores resultados. Por ejemplo, si se aumenta el número de conjuntos borrosos o se cambia el conjunto de reglas se podrían mejorar los resultados.

9. Conclusiones y futuros desarrollos

9.1. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en el capítulo 8 de simulaciones se pueden extraer varias conclusiones:

I. Respecto a las simulaciones realizadas

En primer lugar, se advierte que con tan solo 2 variables de entrada, una variable de salida y 5 conjuntos borrosos por variable, se pueden obtener resultados muy aceptables. En segundo lugar, se concluye que un aumento de la fuerza de los actuadores mejora el confort del viajero. Como trabajo futuro a este proyecto, sería interesante diseñar un controlador que permita obtener un confort similar al obtenido, pero con unos actuadores que aporten menos fuerza. Esto implicaría una reducción de coste, ya que la energía requerida sería menor. En tercer lugar, se comprueba en dos ocasiones, que la utilización de la aceleración como variable de entrada del controlador borroso genera resultados inferiores al caso de la suspensión pasiva. A pesar de aumentar el rango de valores para la fuerza de los actuadores, los índices de comodidad siguen siendo peores. Esto se comprueba, tanto en las suspensiones 4, 5 y 6 como en las suspensiones 7 y 8, donde interviene la aceleración.

Para tener una visión global del trabajo realizado se muestra en la tabla 9.1 los resultados obtenidos en todas las simulaciones realizadas.

Tabla 9.1 - Resultados de las simulaciones

	Punto de medida	NMV _x	NMV _y	NMV _z	NMV
Susp. Pasiva	P.Delantero	0,016907	1,16868	0,960355	1,512739408
	P.Centro	0,0169643	1,16403	0,98879	1,527402793
	P.Trasero	0,0169676	1,16057	1,0179	1,543804079
Susp. Activa 1	P.Delantero	0,013559	1,28468	1,11768	1,702878484
	P.Centro	0,0135528	1,28114	1,13336	1,710557882
	P.Trasero	0,0135505	1,27427	1,14916	1,71595931
Susp. Activa 2	P.Delantero	0,0136583	1,25081	1,07668	1,65043995
	P.Centro	0,0136556	1,24801	1,08887	1,656307131
	P.Trasero	0,0136565	1,24573	1,10314	1,664015502
Susp. Activa 3	P.Delantero	0,0143528	1,00035	0,805085	1,284160419
	P.Centro	0,014351	0,99302	0,826139	1,291820544
	P.Trasero	0,0143495	0,987911	0,845839	1,30062203
Susp. Activa 4	P.Delantero	0,0138171	1,28964	1,406	1,907930356
	P.Centro	0,0138174	1,28463	1,42267	1,916886821
	P.Trasero	0,0138183	1,27965	1,43911	1,925807015
Susp. Activa 5	P.Delantero	0,0122053	1,18982	1,31259	1,77164136
	P.Centro	0,012203	1,18754	1,34076	1,791099534
	P.Trasero	0,0121921	1,18325	1,369	1,809527621
Susp. Activa 6	P.Delantero	0,012692	1,03285	1,37448	1,719341583
	P.Centro	0,012691	1,02893	1,40462	1,741210886

	P.Trasero	0,0126904	1,02504	1,43548	1,763936189
Susp. Activa 7	P.Delantero	0,0183309	1,2018	1,35143	1,808596778
	P.Centro	0,0183312	1,20154	1,35118	1,808237207
	P.Trasero	0,0183317	1,20166	1,35603	1,811943754
Susp. Activa 8	P.Delantero	0,0226744	1,08846	1,28731	1,685949684
	P.Centro	0,0226649	1,09019	1,29526	1,693140987
	P.Trasero	0,0226609	1,09216	1,30554	1,702281314

El resultado óptimo de cara al confort del viajero durante la marcha del vehículo es el correspondiente al caso de la suspensión activa 3, pues se obtienen los índices de comodidad más bajos. Se recuerda que esta suspensión estaba compuesta por un controlador borroso con dos variables de entrada, la posición y la velocidad de los extremos superiores de los actuadores, y una variable de salida, la fuerza de los mismos. Además, las variables contenían 5 conjuntos borrosos, con forma triangular los 3 centrales y con forma trapezoidal los correspondientes a los extremos, distribuidos simétricamente y con un rango de valores para la fuerza de los actuadores comprendida entre -5000 y 5000 N.

II. Respecto a la interacción Simulink-SIMPACK

La conexión de ambos programas es delicada como se ha podido comprobar durante el desarrollo del presente proyecto. Para futuros trabajos, es importante tener en cuenta que SIMPACK trabaja con valores discretos y que por ello, habrá que prestar mucha atención cuando se utilicen datos de SIMPACK en Simulink y viceversa. En este proyecto se ha optado por tratar las señales, ya sea posición, velocidad o aceleración, en SIMPACK directamente para después mandarlas a Simulink. Como ejercicio siguiente a este proyecto, sería interesante tratar las señales de SIMPACK en Simulink, sincronizando entre otros parámetros, los tiempos de integración de ambos programas. Esto permitiría integrar señales en Simulink si fuese necesario en algún caso.

III. Respecto a la implantación del sistema

Como se ha explicado a lo largo del proyecto, una suspensión activa implica un gran coste por su configuración. Para que una tecnología de este tipo, funcionando con lógica borrosa, sea viable tecnológica y económicamente hablando, se ha de continuar estudiando y desarrollando un controlador que ofrezca un rendimiento y una mejora sustanciales frente a los actuales sistemas. Tratándose de un medio de transporte, el principal factor competitivo para conseguir viajeros es el precio del billete, seguido del tiempo empleado en el viaje y de la comodidad del mismo. Por ello, una implantación de un sistema de este tipo incrementaría el precio del billete. Se debe conseguir una reducción del tiempo del viaje, manteniendo los niveles de confort, de manera que se compense el sobre coste de esta tecnología. Como se desarrolló en el apartado 2.4 existen trenes con suspensión activa operativos, con métodos de control diferentes, lo que supone un aliciente para desarrollar un controlador con lógica borrosa en vehículos ferroviarios del mismo tipo.

9.2. Futuros desarrollos

En el presente proyecto se han planteado 8 suspensiones activas diferentes. Como se ha comentado, solamente se ha cambiado el diseño del controlador borroso. Sin embargo, por el abanico de posibilidades que brinda la lógica borrosa, el número de simulaciones se puede aumentar mucho más. Si se varían las reglas, el número y tipo de conjuntos borrosos o las variables del controlador, se pueden obtener muchas más conclusiones interesantes.

Como siguiente paso a este proyecto, un buen estudio podría ser tomar los resultados aquí obtenidos e intentar reducir el rango de actuación de los actuadores, manteniendo el mismo nivel de confort, de manera que la energía necesaria para el funcionamiento del sistema se reduciría y por tanto el coste del mismo.

Por otro lado, en este proyecto sólo se ha planteado una aplicación de la lógica borrosa en el caso de la suspensión secundaria vertical. Como continuación, sería de gran interés realizar de manera análoga a este proyecto un estudio para una suspensión secundaria lateral activa. Esto permitiría continuar la línea de estudio de la basculación en curva y su respuesta ante un sistema de suspensión activa.

A nivel de software, queda pendiente estudiar en profundidad la interacción SIMPACK y Simulink, que por su actual desarrollo presenta complejidades que dificultan la realización de las simulaciones. Sería de gran interés, que se consiguiera poder intercambiar información entre ambos programas sin reparar en cuál de los dos programas se realice el tratamiento de las señales que intervengan.

Anexos

A. CAJA

▪ Propiedades

Tabla A - 1 . Propiedades de la caja del vehículo

Masa	32000	kg
Centro de gravedad	-1,8	m
I_{xx}	56800	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
I_{yy}	19700000	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
I_{zz}	19700000	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$I_{xy}=I_{yx}=I_{xz}=I_{zx}=I_{yz}=I_{zy}$	0	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Densidad	1	kg/m^3

Este cuerpo, a pesar de tener las dimensiones que muestra la tabla A.1, no actúa como un cuerpo con la masa distribuida, sino que tiene toda su masa concentrada en el centro de gravedad. Por ello, la densidad del cuerpo es una cantidad despreciable de $1 \text{ kg}/\text{m}^3$

▪ Dimensiones

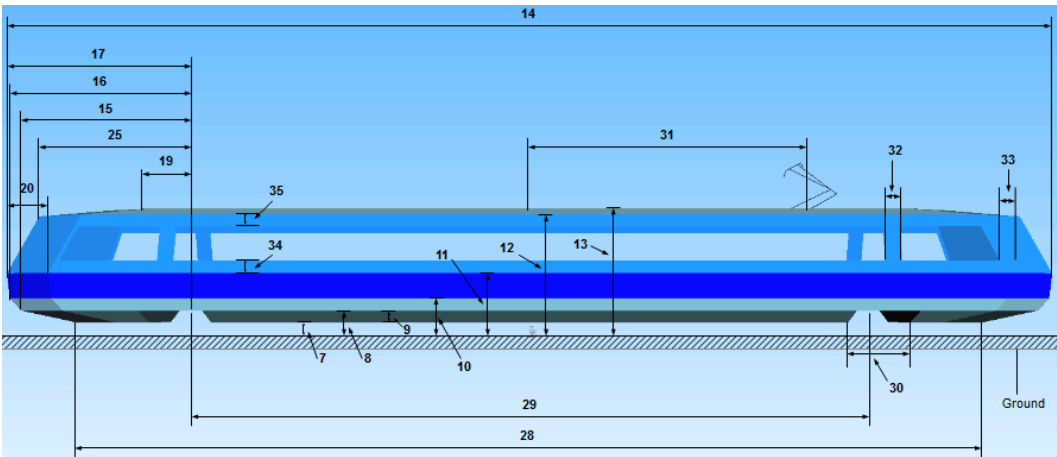


Figura A - 1. Cotas de la caja del vehículo

Tabla A - 2. Valores de las cotas de la figura A-1

7	0,5	m	22	3,02	m
8	0,3	m	23	3,02	m
9	1,2	m	24	2,83	m
10	1,29	m	25	1,79	m
11	2	m	26	1,45	m
12	3,16	m	27	0,3	m
13	4,05	m	28	26,6	m
14	22,4	m	29	19	m
15	1,77	m	30	3,8	m
16	2,4	m	31	0	m
17	2,5	m	32	0,36	m
18	2,04	m	33	0,4	m
19	0,75	m	34	0,66	m
20	0,3	m	35	0,14	m
21	2,79	m			

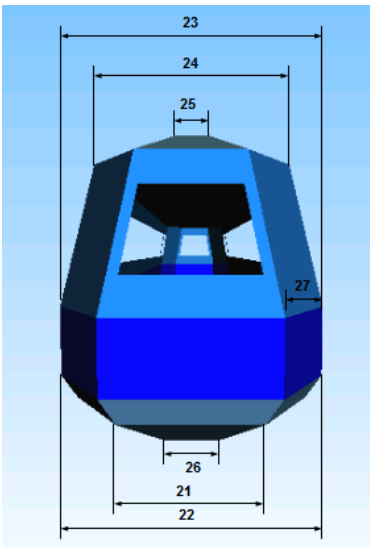


Figura A - 2. Cotas de la caja del vehículo

B. BASTIDOR DE BOGIE

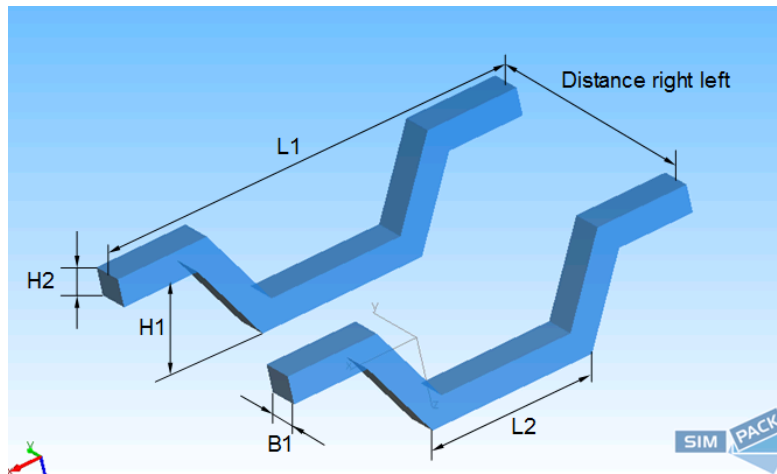


Figura B - 1. Cotas del bogie del vehículo

B.1. Propiedades

Tabla B - 1. Propiedades del bastidor de bogie del vehículo

Masa	2615	kg
Centro de gravedad	-0,6	m
I_{xx}	1722	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
I_{yy}	1476	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
I_{zz}	3076	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$I_{xy}=I_{yx}=I_{xz}=I_{zx}=I_{yz}=I_{zy}$	0	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Densidad	1	kg/m^3

Al igual que para la caja, el bastidor de bogie también tiene concentrada su masa en su centro de gravedad.

B.2. Dimensiones

Tabla B - 2. Valores de las cotas de la figura B-1

L1	3,2	m
L2	1,2	m
H1	-0,6	m
H2	0,2	m
B1	0,25	m
Distance right left	2	m

B - 3

C. Cabezal fijo

Como se ha comentado en el capítulo 6, se ha dispuesto un cabezal fijo para representar la unión entre la caja y los bogies del vehículo. Este cuerpo tiene las siguientes características:

- **Propiedades**

Tabla C - 1. Propiedades del cabezal fijo

Masa	1,00E-06	kg
Centro de gravedad	-1,22	m
I_{xx}	1,00E-06	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
I_{yy}	1,00E-06	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
I_{zz}	1,00E-06	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$I_{xy}=I_{yx}=I_{xz}=I_{zx}=I_{yz}=I_{zy}$	0	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Densidad	1	kg/m^3

Dado que su única función es representar la unión de caja y bogie su masa es despreciable.

- **Dimensiones**

Tabla C - 2. Valores de las cotas de la figura B-1

Longitud en X	1	m
Longitud en Y	3	m
Longitud en Z	0,2	m

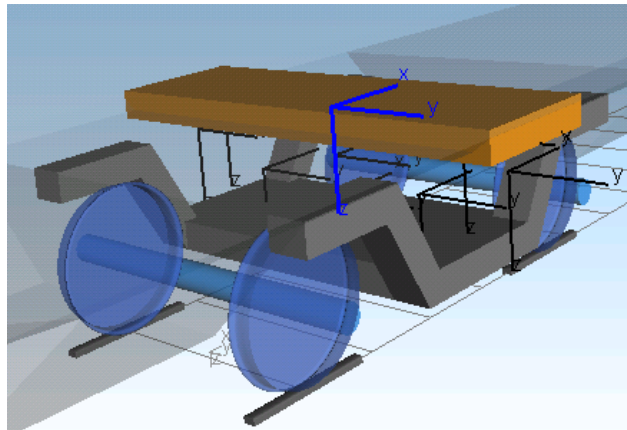


Figura C - 1. Caja y bogie unidos mediante el cabezal fijo

D. Rueda

▪ Propiedades

Tabla D - 1. Propiedades de las ruedas

Masa	1000	kg
Centro de gravedad	0	m
I_{xx}	1000	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
I_{yy}	100	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
I_{zz}	1000	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$I_{xy}=I_{yx}=I_{xz}=I_{zx}=I_{yz}=I_{zy}$	0	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Módulo Young	210	GPa
Número de Poisson	0,28	
Coefficiente fricción	0,4	
Carga por rueda	40	kN

▪ Dimensiones

Tabla D - 2. Dimensiones de la rueda

Radio	460	mm
-------	-----	----

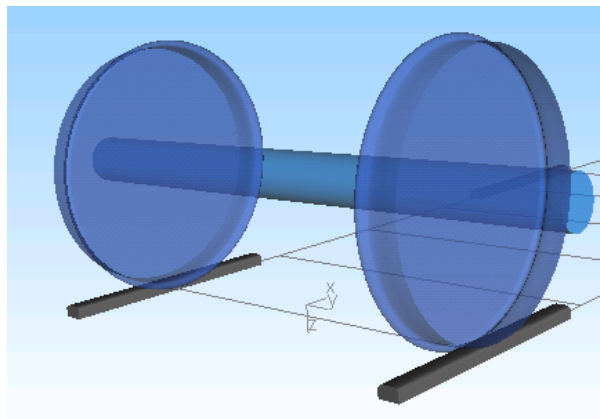


Figura D - 1. Conjunto eje-rueda

E. Eje

▪ Propiedades

Tabla E- 1. Densidad del eje

Densidad	7850	kg/m^3
----------	------	------------------------

▪ Dimensiones

Tabla E- 2. Dimensiones del eje

Diámetro	0,18	m
Longitud	2,2	m

F. Perfil rueda y carril

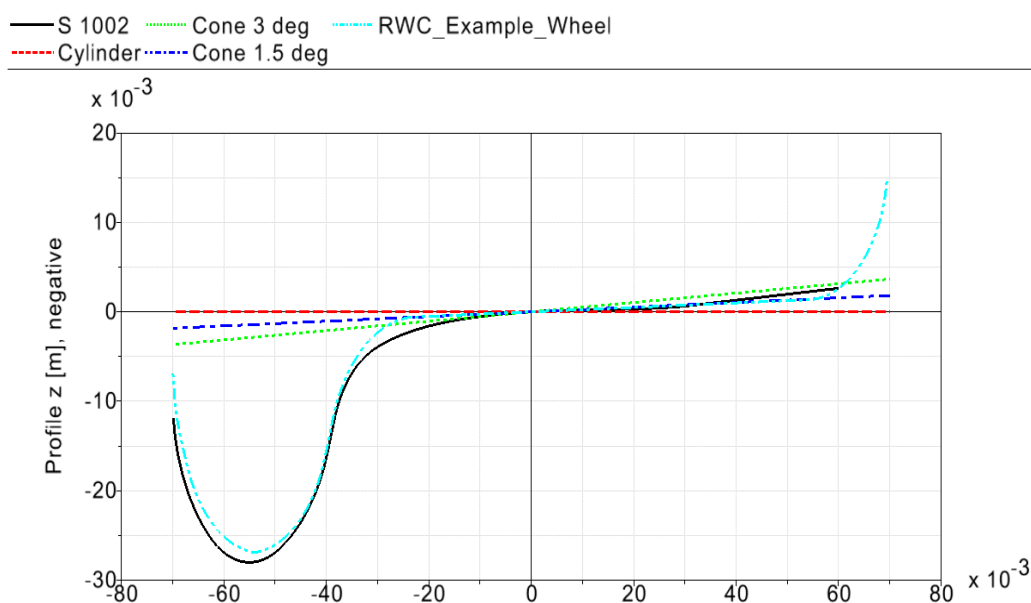


Figura F - 1. Perfiles de rueda disponibles en SIMPACK

SIMPACT permite seleccionar entre varios perfiles para la rueda. En este caso el perfil elegido ha sido el S 1002.

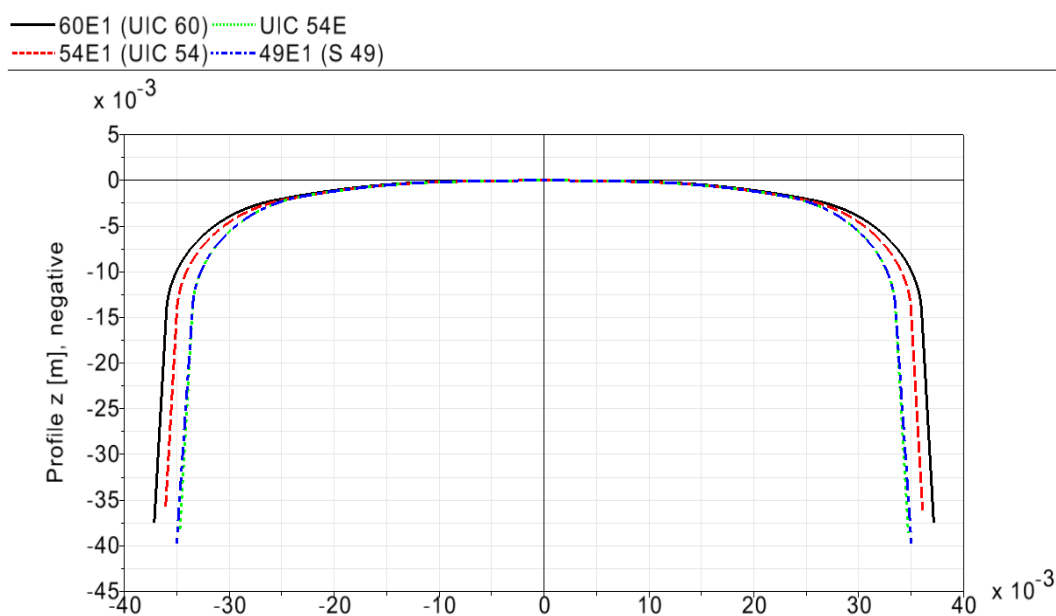


Figura F - 2. Perfiles para el carril de la vía disponibles en SIMPACK

Para los carriles, SIMPACK también permite elegir varios perfiles o incluso definir uno propio. En este proyecto se ha elegido el perfil UIC 60.

Según los perfiles seleccionados el contacto queda definido como muestra la figura A-18.

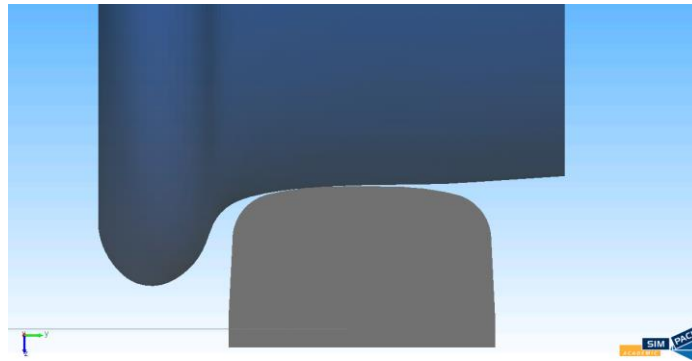


Figura F - 3. Contacto rueda-carril

Además, tal y como se ha comentado en el apartado 6.1, el ancho de vía es de 1435 mm.

G. Elementos de suspensión

En este apartado se muestran las características de los elementos que forman la suspensión del vehículo ferroviario.

- **Suspensión primaria**

- i. RESORTES**

Force Element Properties: \$S_Bogie_R.\$G_Primary_Suspension.\$F_Pri...

Name:

Description:

From Marker:

To Marker:

Type:

Disabled: ☐

Parameters | Dyn. States | Output Values

Filter:

2: Nominal force F_nom_x:	-26.47870280373363
3: Nominal force F_nom_y:	3.383634128330716
4: Nominal force F_nom_z:	-45935.80155774068
5: Nominal torque T_nom_al:	-219.5424130856084
6: Nominal torque T_nom_be:	2.455966980119861e-12
7: Nominal torque T_nom_ga:	1.416874874987878
8: Transl. ser. stiffness cs_x:	60000000
9: Transl. ser. stiffness cs_y:	7500000
10: Transl. ser. stiffness cs_z:	0
11: Rotat. ser. stiffness cs_al:	0
12: Rotat. ser. stiffness cs_be:	0
13: Rotat. ser. stiffness cs_ga:	0
14: Transl. ser. damping ds_x:	15000
15: Transl. ser. damping ds_y:	2000
20: Transl. par. stiffness cp_x:	31391000
21: Transl. par. stiffness cp_y:	3884000
22: Transl. par. stiffness cp_z:	1220000
23: Rotat. par. stiffness cp_al:	0
24: Rotat. par. stiffness cp_be:	0
25: Rotat. par. stiffness cp_ga:	0
26: Transl. par. damping dp_x:	0
27: Transl. par. damping dp_y:	0

☒ Comment

Figura G - 1. Características de los resortes de la suspensión primaria

Con una longitud nominal de 0,42 m cada resorte vertical.

ii. AMORTIGUADORES

Los amortiguadores de la suspensión primaria están representados por un resorte con una constante de rigidez de 600000 N/m y por la curva de actuación siguiente:

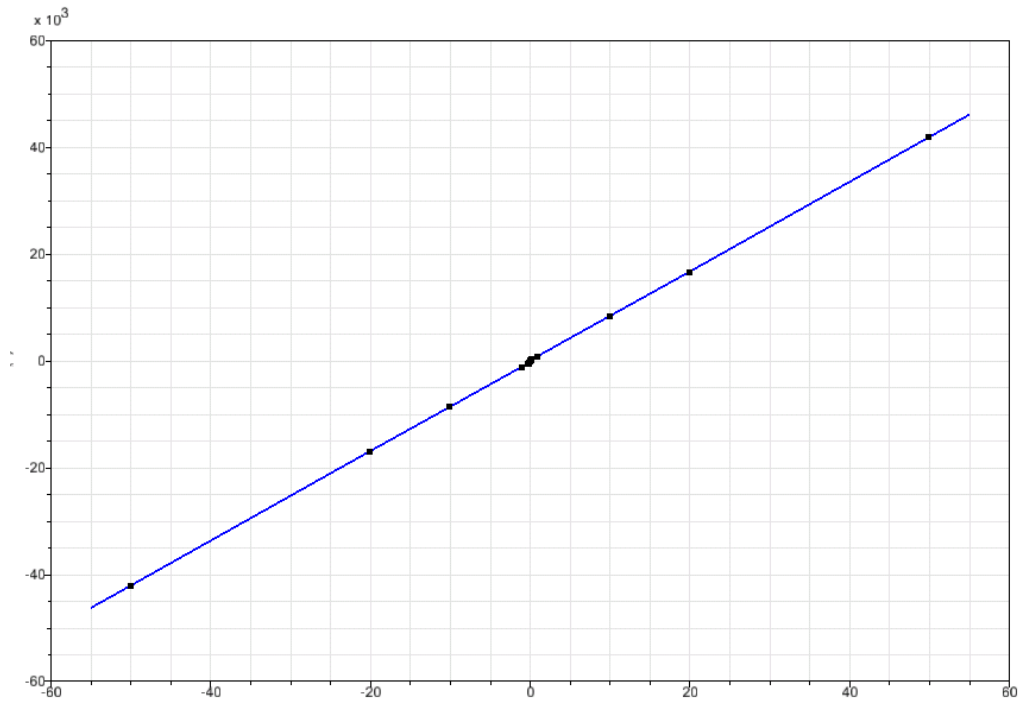


Figura G - 2. Curva de actuación de los amortiguadores de la suspensión primaria

▪ Susp.Secundaria

i. RESORTES

Resortes verticales

Force Element Properties: \$\$_Bogie_R.\$G_Secondary_Suspension.\$F_SecR

Name:\$\$_Bogie_R.\$G_Secondary_Suspension.\$F_SecR

Description:

From Marker:\$_\$Bogie_R.\$M_dummy_SecR

To Marker:\$_\$Bogie_R.\$M_bogie_SecSpringR

Type:79: Shear spring Cmp

Disabled:☐

Parameters

Output Values

Filter:

3: l_nom_z Nominal height:	0.605
4: F_nom_x Nominal force:	-28.67163100826892
5: F_nom_y Nominal force:	-155.1373016560207
6: F_nom_z Nominal force=preload:	-56717.77663445919
7: L_nom_x Nominal torque:	1346.949186791795
8: L_nom_y Nominal torque:	84.57693851317947
9: L_nom_z Nominal torque:	5.052689154143892
10: cx Longitudinal shear stiff.:	160000
11: cy Lateral shear stiffness:	160000

☒ Comment

OK

Cancel

Apply

Figura G - 3. Características de los resortes verticales de la suspensión secundaria

Barra antitorsi3n

Force Element Properties: \$\$Bogie_R.\$G_Secondary_Suspension.\$F_SecRollBar

Name: \$\$Bogie_R.\$G_Secondary_Suspension.\$F_SecRollBar

Description:

From Marker: \$\$Bogie_R.\$M_dummy_SecRoll

To Marker: \$\$Bogie_R.\$M_bogie_SecRoll

Type: 13: Spring-Damp Rot Meas Inp Cmp

Disabled: ☐

Parameters | Output Values

Filter:

1: Nominal torque in al:	1346.949186791795	
2: Nominal torque in be:	84.57693851317947	
3: Nominal torque in ga:	5.052689154143892	
4: Stiffness in al:	940000	
5: Stiffness in be:	0	
6: Stiffness in ga:	0	
7: Damping in al:	0	
8: Damping in be:	0	
9: Damping in ga:	0	
10: Mode of angle calculation:	All angles < 10 [deg]	P
11: Input Function T_c(al):		E
12: Input Function T_c(be):		E
13: Input Function T_c(ga):		E
14: Input Function T_d(al):		E
15: Input Function T_d(be):		E
16: Input Function T_d(ga):		E

☒ Comment + -

OK Cancel Apply

Figura G - 4. Características de la barra antitorsi3n

Bumpstop

Force Element Properties: $\$S_Bogie_R.\$G_Secondary_Suspension.\$F_BumpStop$

Name:

$\$S_Bogie_R.\$G_Secondary_Suspension.\$F_BumpStop$

Description:

From Marker:

$\$S_Bogie_R.\$M_dummy_BumpStop$

To Marker:

$\$S_Bogie_R.\$M_bogie_Bumpstop$

Type:

5: Spring-Damper Parallel Cmp

Disabled:

☐

Parameters

Output Values

Filter:

1: Nominal force in x:

-53.00942800728615

2: Nominal force in y:

312.9275407856624

3: Nominal force in z:

-58064.72582125104

4: Stiffness in x:

0

5: Stiffness in y:

0

6: Stiffness in z:

0

7: Damping in x:

0

8: Damping in y:

0

9: Damping in z:

0

10: Input Function $F_c(x)$:

11: Input Function $F_c(y)$:

12: Input Function $F_c(z)$:

13: Input Function $F_d(xd)$:

14: Input Function $F_d(yd)$:

15: Input Function $F_d(zd)$:

16: Clearance in x:

0

☒ Comment

+

-

OK

Cancel

Apply

Figura G - 5. Características del resorte bumbstop

ii. AMORTIGUADORES

Los amortiguadores de la suspensión secundaria están representados por un resorte con una constante de rigidez de 600000 N/m y por las curvas de actuación siguientes.

Amortiguador vertical

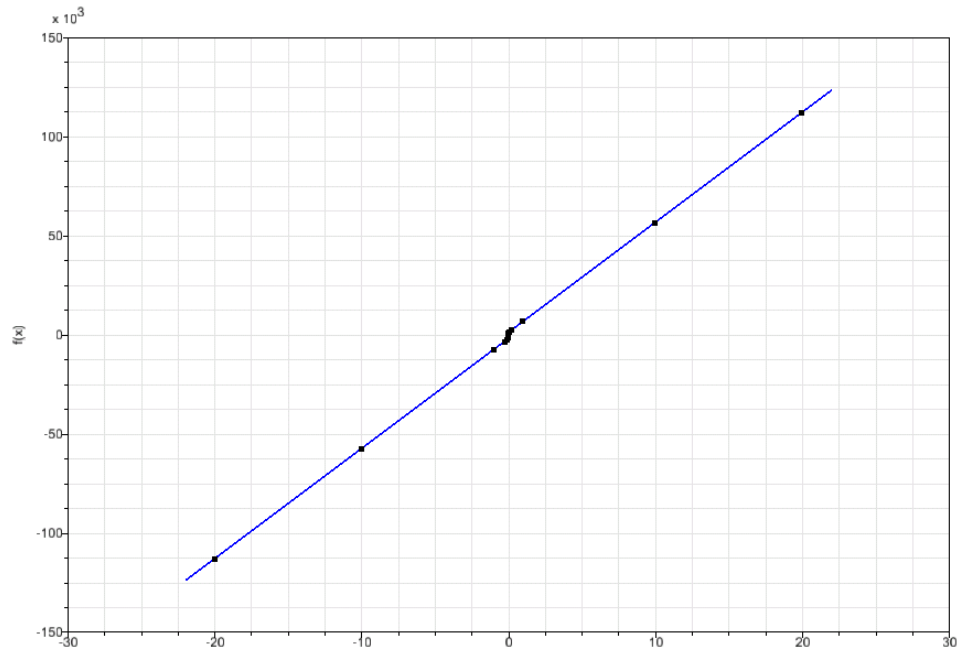


Figura G - 6. Curva de actuación de los amortiguadores verticales de la suspensión secundaria

Amortiguador lateral

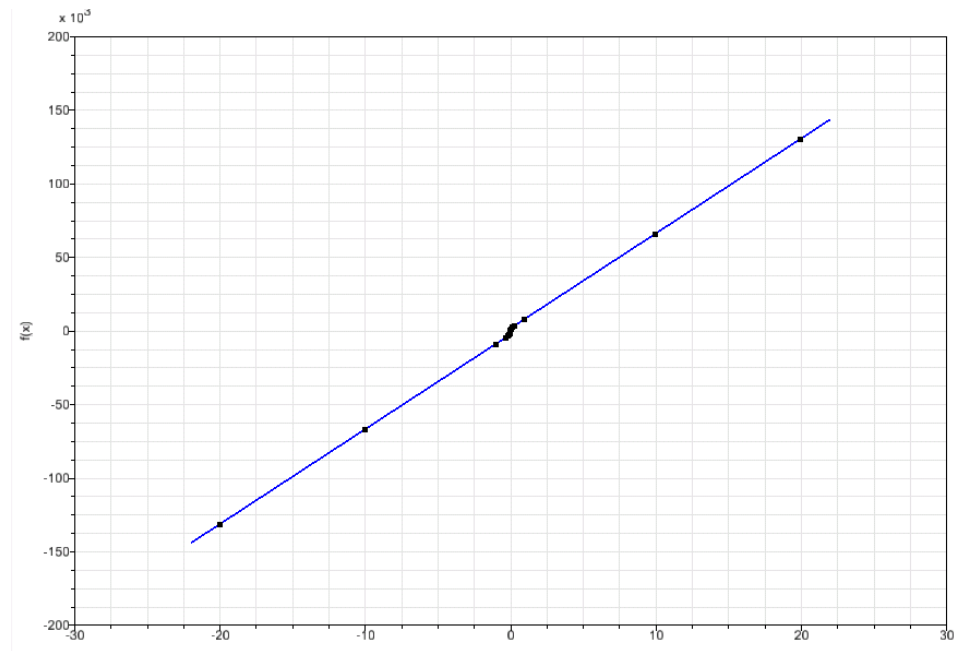


Figura G - 7. Curva de actuación de los amortiguadores laterales de la suspensión secundaria

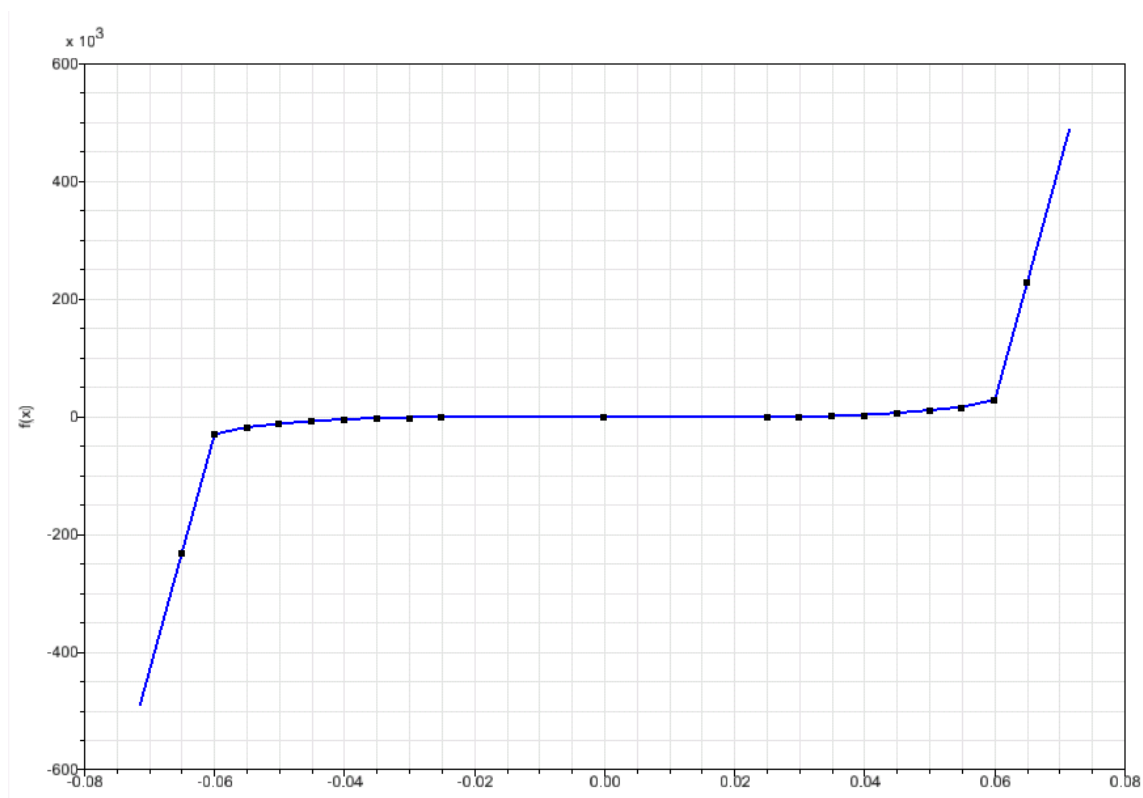
Bumpstop

Figura G - 8. Curva de actuación del bumpstop

Bibliografía

- [1] Apuntes asignatura "Ferrocarriles" Ingeniería Industrial. - : Universidad Carlos III de Madrid, 2013-2014.
 - [2] **Díaz López, Vicente** Automóviles y ferrocarriles [Libro]. - Madrid : UNED, 2012.
 - [3] **Iwnicki, Simon** Handbook of Railway Vehicle Dynamics [Libro]. - 2006.
 - [4] **Orvnäs, Anneli** Active Secondary Suspension in Trains [En línea]. - 2008. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:371659/FULLTEXT01.pdf>. Consultado en: 11 de 2014.
 - [5] **Varios autores.** Los Sistemas de Suspensión Activa y Semiactiva: Una revisión - 2013
 - [6] Todotren [En línea]. - <http://www.todotren.com.ar/trenes/x2000.htm>. Consultado en: 12 de 2014.
 - [7] Railway Technology [En línea]. - <http://www.railway-technology.com/projects/sweden>. Consultado en: 12 de 2014.
 - [8] Railway Technology [En línea]. - <http://www.railway-technology.com/projects/pendolino-train/>. Consultado en: 12 de 2014.
 - [9] Todotren [En línea]. - <http://www.todotren.com.ar/trenes/pendo1.htm>. Consultado en: 12 de 2014.
 - [10] Development of an Active Suspension System for Railway Vehicles [En línea]. -- <http://www.nssmc.com/en/tech/report/sm/pdf/1b030001.pdf>. Consultado en: 12 de 2014.
 - [11] Mechatronics in Japanese rail vehicles: active and semi-active suspensions [En línea]. - 2001. - <http://taw-co.ir/Portals/0/articles/1-s2.0-S0967066101001654-main.pdf>. - pág. 999-1004. Consultado en: 12 de 2014.
 - [12] Railway Gazette [En línea]. - <http://www.railwaygazette.com/news/passenger/single-view/view/jr-east-unveils-super-komachi-high-speed-train.html>. Consultado en: 12 de 2014.
 - [13] CAF - Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles [En línea]. - <http://www.caf.es/es/innovacion-tecnologia/productos-tecnologicos/sibi.php>. Consultado en: 12 de 2014.
 - [14] **Passino, Kevin M.** Fuzzy Control [Libro]. - 1998. - págs. 3-64.
 - [15] **D.Driankov, H.Hellendoorn y M.Reinfrank** An Introduction to Fuzzy Control [Libro]. - 1993. - págs. 132-145.
 - [16] **Matlab** Documentación de Matlab.
 - [17] The New York Times [En línea]. - <http://www.nytimes.com/1989/04/02/us/fuzzy-computer-theory-how-to-mimic-the-mind.html?pagewanted=1>. Consultado en: 11 de 2014.
-

- [18] **Álvarez Rodríguez, Julio** Ingeniería ferroviaria [Libro]. - : Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [19] **Melis Maynar, Manuel y González Fernández, Francisco Javier** Ferrocarriles Metropolitanos [Libro]. - 2008. - págs. 652-653.
- [20] **AENOR** UNE-EN 13848-5 Aplicaciones ferroviarias. Vía. Calidad de la geometría de la vía. Parte 5: Niveles de calidad geométrica. - 2011.
- [21] **Fernández López, Alberto** Proyecto final de carrera. Estudio del nivel de confort en el transporte ferroviario mediante Adams/Rail. - Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [22] **AENOR** UNE-EN 12299 Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los viajeros. Medición y evaluación.. - 2010.
- [23] **SIMPACK** Manual de SIMPACK.
- [24] **Jurado Zurro, Juan** Proyecto final de carrera. Estudio del Comportamiento Dinámico de un Vehículo Ferroviario Equipado con Suspensión Secundaria Semiactiva Utilizando Lógica Difusa - [s.l.] : Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [25] **Pérez Rello, Adrián** Proyecto final de carrera. Desarrollo de una suspensión semi-activa en un vehículo automóvil basado en lógica fuzzy- [s.l.] : Universidad Carlos III de Madrid, 2011.